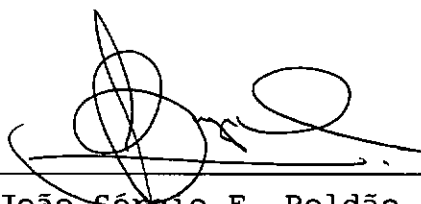


DISPERSÃO LONGITUDINAL EM RIOS: DESEMPENHO DE MÉTODOS
DE PREVISÃO E DE TRAÇADORES FLUORESCENTES

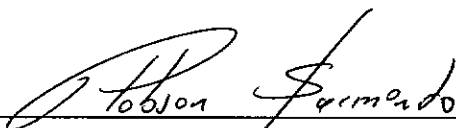
DANIEL RIGO

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:



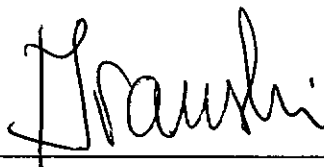
Prof. João Sérgio F. Roldão, M. Sc.
(Presidente)



Prof. Robson Sarmento, Ph. D.



Prof. Paulo Cesar C. Rosman, Ph. D.



Joel Meyer Branski, Ph. D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 1992

RIGO, DANIEL

Dispersão longitudinal em rios: desempenho de métodos de previsão e de traçadores fluorescentes. [Rio de Janeiro] 1992

X, 114 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M. Sc., Engenharia Civil, 1992)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1.Dispersão em rios 2.Traçadores I.COPPE/UFRJ

II. Título(série).

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. João Roldão, pela orientação dedicada e pelo apoio em horas difíceis.

Ao Homero, pelas proveitosas discussões e por toda ajuda nos ensaios de campo e na parte computacional.

A Simone, pela ajuda nos ensaios de campo e na preparação do texto final desta tese.

A todos os funcionários do Laboratório de Traçadores, que tanto me ajudaram com sua cooperação e amizade. Um abraço ao Seu Emygdio, Amauri, Franklin, Djalma, André, Henrique, Palhano, Otávio e Moura.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.).

DISPERSÃO LONGITUDINAL EM RIOS: DESEMPENHO DE MÉTODOS
DE PREVISÃO E DE TRAÇADORES FLUORESCENTES

Daniel Rigo

Março de 1992

Orientador : João Sérgio Fajardo Roldão

Programa: Engenharia Civil

Esta tese trata da determinação do coeficiente de dispersão longitudinal (DL) em rios, através de fórmulas empíricas, métodos analíticos e métodos que utilizam resultados de ensaios com traçadores.

Valores de DL são calculados em diferentes condições de vazão em um trecho do rio Paraíba do Sul e também no trecho compreendido entre a Estação Elevatória de Santa Cecília e a Estação de Tratamento de Água do Guandú, onde foram realizados vários ensaios, de longa duração, com o uso de traçadores fluorescentes.

No mesmo rio foi realizado um ensaio, de curta duração, para a determinação experimental do coeficiente de difusão transversal.

É feita uma análise comparativa do desempenho dos três traçadores fluorescentes utilizados nos ensaios de longa e curta duração (Uranina, Amidorodamina G e Sulforodamina B).

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.).

LONGITUDINAL DISPERSION IN RIVERS: COMPARISON OF
PREVISION METHODS AND PERFORMANCE OF FLUORESCENT TRACERS

Daniel Rigo

March - 1992

Thesis Supervisor : João Sérgio Fajardo Roldão
Department : Civil Engineering

This thesis presents the determination of the longitudinal dispersion coefficient (D_L) in rivers, applying empirical equations, analytical methods and methods that use results obtained from tracer experiments.

The values of D_L were calculated under different flow conditions of the Paraíba do Sul river and also in the reach Santa Cecília Pumping Station - Guandú Water Treatment Plant, where many long-term experiments with fluorescent tracers were carried out.

In the same river a short-term experiment was conducted to experimentally determine the transversal diffusion coefficient.

A comparative analysis of the experimental performance of each of three fluorescent tracers (Uranine, Amido-rhodamine G and Sulphorhodamine B) in the long and short-term experiments is presented.

ÍNDICE

I - Introdução	1
II - Revisão Bibliográfica	4
II-1) Dispersão longitudinal	4
II-1.1) Equação de dispersão uni-dimensional	4
II-1.2) Métodos de cálculo do coeficiente de dispersão longitudinal	15
1-Fórmulas empíricas	15
2-Métodos analíticos	21
3-Métodos com uso de traçador	26
II-2) Difusão transversal	34
II-2.1) Equação de difusão transversal	34
II-2.2) Métodos de cálculo do coeficiente de difusão transversal	35
1-Fórmulas empíricas	35
2-Métodos com uso de traçador	36
III - Ensaios de Dispersão Longitudinal	38
III-1) Traçadores	38
III-2) Procedimentos de campo	39
III-3) Medidas de fluorescência	41
1-Medidas no campo	41
2-Medidas no laboratório	43
III-4) Ensaios realizados	47
IV - Determinação do Coeficiente de Dispersão Longitudinal	63
IV-1) Fórmulas empíricas	63
IV-2) Métodos analíticos	64
IV-3) Métodos com uso de traçador	66
1-Ajustes de curvas de passagens	66
2-Cálculo de D_L	69
IV-4) Discussão de resultados	73

V - Ensaio de Difusão Transversal	76
V-1) Traçadores	76
V-2) Procedimentos de campo	77
V-3) Medidas de fluorescência	79
1-Medidas no campo	79
2-Medidas no laboratório	80
V-4) Ensaio executado	80
VI - Determinação do Coeficiente de Difusão	
Transversal	89
VI-1) Fórmulas empíricas	89
VI-2) Método com uso de traçador	89
VI-3) Discussão de resultados	92
VII - Desempenho de Traçadores	94
VII-1) Introdução	94
VII-2) Ensaio de longa duração	96
VII-3) Ensaio de curta duração	104
VIII - Conclusões e Recomendações	108
IX - Referências Bibliográficas	111
Apêndice I - Medições de vazão em Volta Redonda e Pinheiral.	
Apêndice II - Ajustes de curvas de passagem de Uranina para determinação do coeficiente de dispersão longitudinal.	
Apêndice III - Gráficos de perda de Uranina nos ensaios dos dias 19/02/90, 09/09/86, 08/01/87, 29/01/87, 15/12/87, 21/02/91 e 26/02/91.	

SIMBOLOGIA

- A = área da seção transversal (L^2)
 c = concentração pontual instantânea (M/L^3)
 C = concentração pontual média no tempo (M/L^3)
 C_v = concentração média na vertical (M/L^3)
 C_0 = concentração de injeção (M/L^3)
 \bar{C} = média da concentração na seção transversal (M/L^3)
 C' = desvio da concentração em relação a \bar{C} (M/L^3)
 C_k = parâmetro adimensional
 D = coeficiente de difusão molecular (L^2/T)
 D_L = coeficiente de dispersão longitudinal (L^2/T)
 d = profundidade (L)
 \bar{d} = profundidade média (L)
 $d(y)$ = perfil transversal de profundidades
 F = número de Froude (adimensional)
 f = fluxo de massa dissolvida ($M/L^2.T$)
 g = aceleração da gravidade (L/T^2)
 k = coeficiente de dispersão de fluxo (L^2/T)
 ℓ = distância do ponto de velocidade máxima à margem mais distante (L)
 \dot{M} = fluxo de massa de soluto ($M/T.1/L$)
 M = massa (M)
 \bar{m} = média da distribuição de concentrações
 Q = vazão (L^3/T)
 q = vazão por unidade de largura (L^2/T)
 q' = vazão por unidade de largura integrada ao longo da profundidade num ponto y (L^2/T)
 \bar{q} = vazão por unidade de largura média na seção transversal (L^2/T)
 R = raio hidráulico (L)
 S = gradiente de energia (adimensional)
 t = tempo (T)
 t = tempo correspondente à distribuição de concentrações de jusante (T)
 \bar{t} = tempo médio de passagem da distribuição de traçador na seção de monitoramento (T)

- u = velocidade pontual instantânea na direção x (L/T)
 U = velocidade pontual média no tempo em x (L/T)
 U_v = velocidade média na vertical na direção x (L/T)
 \bar{u} = média da velocidade na seção transversal (L/T)
 u' = desvio da velocidade em relação a \bar{u} (L/T)
 \bar{u}' = média dos desvios da velocidade em relação à velocidade média da seção (L/T)
 u^* = velocidade de cisalhamento (L/T)
 $\bar{u}^z(y)$ = perfil transversal das velocidades médias na profundidade
 v = velocidade pontual instantânea na direção y (L/T)
 V = velocidade pontual média no tempo em y (L/T)
 V_v = velocidade média na vertical na direção y (L/T)
 v_a = velocidade advectiva (L/T)
 w = velocidade na direção z (L/T)
 W = velocidade pontual média no tempo em z (L/T)
 W = largura da seção (L)
 x = coordenada cartesiana da direção do fluxo (L)
 y = coordenada cartesiana na direção da largura da seção (L)
 z = coordenada cartesiana na direção da profundidade da seção (L)
 α = constante de proporcionalidade (adimensional)
 $\delta(x)$ = função delta de Dirac
 Δx = incremento na direção x (L)
 ΔX = distância entre seções de monitoramento (L)
 E_x, E_y e E_z = coeficientes de difusão turbulenta nas direções x, y e z (L²/T)
 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ = coeficientes de difusão médios na vertical nas direções x e y (L²/T)
 ρ = densidade do fluido (M/L³)
 σ_x^2 = variância da distribuição de concentrações em relação a x (L²)
 σ_t^2 = variância da distribuição de concentrações em relação a t (T²)
 σ_y^2 = variância da distribuição C versus y (L²)
 τ = tempo num sistema que se move com a velocidade média do fluxo (T)

- τ =tempo correspondente à distribuição de concentrações de montante (T)
- τ_0 =tensão de cisalhamento exercida pelo escoamento turbulento sobre as paredes do canal (M/LT^2)
- ξ =coordenada cartesiana na direção do fluxo num sistema que se move com a velocidade média (L)

I - INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com a poluição do meio ambiente estimulou um grande desenvolvimento para os modelos de previsão da qualidade da água. Para uma utilização confiável da maioria destes modelos é necessária a determinação experimental "in situ" de parâmetros que traduzam as características particulares de cada corpo d'água, pois a complexidade e diversidade dos escoamentos naturais impede uma aproximação puramente teórica.

O modelo uni-dimensional, devido à sua simplicidade, é um dos modelos mais utilizados na previsão da qualidade de água em rios. Em modelos uni-dimensionais que envolvem o lançamento accidental de poluentes solúveis, um dos parâmetros mais importantes é o coeficiente de dispersão longitudinal (DL).

Em estudos preliminares, a determinação de DL pode ser feita através do emprego de fórmulas empíricas e métodos analíticos. Estas formulações, que utilizam valores de características da seção transversal e do escoamento, têm sua facilidade de uso fortemente comprometida pelas grandes imprecisões a elas inerentes. Algumas destas formulações utilizadas na determinação aproximada do coeficiente de dispersão longitudinal apresentam o valor de DL expresso em função do valor do coeficiente de difusão transversal (ϵ_y), também aproximado por uma fórmula empírica. Apesar de não ser o objetivo principal deste trabalho, foi realizado um ensaio de curta duração com traçador para a determinação experimental de ϵ_y , visando a compará-lo com o valor calculado pela fórmula empírica.

Ensaio com traçador são reconhecidos como a forma adequada de determinação de DL, pois os traçadores simulam corretamente o movimento e a dispersão do soluto, levando implicitamente em consideração todas as particularidades geométricas e hidrodinâmicas do escoamento no trecho de rio ensaiado.

Nos ensaios para determinação experimental de D_L "in situ" são normalmente utilizados traçadores radioativos ou fluorescentes. Inconvenientes relacionados com a proteção radiológica, inerentes ao uso de traçadores radioativos, têm contribuído para uma redução contínua do uso destes traçadores. Por outro lado, a otimização das técnicas analíticas permitem atualmente uma grande eficiência na detecção de traçadores fluorescentes, que aliada à possibilidade de detecção seletiva (medição simultânea de mais de um traçador) tornaram a utilização hidrológica deste tipo de traçador muito atraente.

Nos ensaios realizados na bacia do rio Paraíba do Sul objetivando a determinação experimental de D_L e ϵ_y foram utilizados os traçadores fluorescentes Uranina, Amidorodamina G e Sulforodamina B. Os resultados obtidos permitiram comparar valores experimentais de D_L e ϵ_y com valores previstos por fórmulas empíricas e métodos analíticos.

O uso simultâneo do traçador Uranina (sensível a perdas por fotodecomposição) com os traçadores de referência Amidorodamina G e Sulforodamina B (insensíveis a perdas por fotodecomposição) permitiu obter informações detalhadas a respeito do comportamento efetivo da Uranina em rios tropicais, em ensaios de longa e curta duração. O grande interesse na utilização de Uranina reside no fato de que este traçador é encontrado no mercado nacional a um preço bastante inferior aos demais, que são importados.

No Capítulo II é feita uma revisão bibliográfica, onde é apresentada a dedução da equação de dispersão uni-dimensional e das diversas metodologias para determinação de D_L , tanto das fórmulas empíricas e métodos analíticos quanto dos métodos que utilizam resultados de ensaios com traçador. Neste capítulo são apresentadas ainda a equação utilizada neste estudo como modelo da difusão transversal e as metodologias empregadas na determinação de ϵ_y .

O Capítulo III apresenta a descrição dos materiais e técnicas utilizados nos ensaios para determinação de D_L realizados em dois diferentes trechos da bacia do rio Paraíba

do Sul. No primeiro trecho, situado em um trecho natural do rio Paraíba do Sul, foram realizados quatro ensaios em diferentes condições de vazão. No segundo trecho, composto de canais, tubulações, reservatórios e rio, foram realizados quatro outros ensaios.

No Capítulo IV são determinados os valores de D_L por fórmulas empíricas, métodos analíticos e metodologias envolvendo o uso de ensaios com traçadores fluorescentes.

No Capítulo V é feita uma descrição detalhada do ensaio de difusão transversal realizado no rio Paraíba do Sul, apresentando-se as curvas de distribuição transversal de concentrações, medidas em sete seções.

No Capítulo VI são realizadas determinações do valor de ϵ_y , a partir de fórmula empírica e dos resultados experimentais apresentados no Capítulo V.

No Capítulo VII é feita uma análise comparativa do desempenho da Uranina em relação aos traçadores de referência, em ensaios de longa duração (apresentados no Capítulo III) e em ensaio de curta duração (apresentado no Capítulo V).

O Capítulo VIII apresenta as principais conclusões e recomendações obtidas nos estudos realizados.

O Capítulo IX apresenta a bibliografia utilizada.

II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os modelos matemáticos utilizados neste trabalho para simular o transporte de traçadores fluorescentes em rios. Estes modelos baseiam-se na equação de advecção-difusão, e os chamados "modelos de zonas estagnadas" como os apresentados por BEER e YOUNG (1983), BELTAOS (1980) e PETERSEN (1977) não fazem parte do escopo deste trabalho. Serão também deduzidas as formulações utilizadas para cálculo dos coeficientes de dispersão longitudinal e de difusão transversal.

II-1) Dispersão longitudinal

Nesta seção será deduzida a equação diferencial normalmente utilizada para descrever o transporte de material solúvel em rios, indicando-se as simplificações efetuadas na sua dedução. Os traçadores fluorescentes são considerados completamente solúveis e serão tratados como conservativos, assim nas equações não aparecerá o termo correspondente a perdas. Serão apresentados também as metodologias utilizadas para cálculo do coeficiente de dispersão longitudinal.

II-1.1) Equação de dispersão uni-dimensional

Neste ítem será apresentado o desenvolvimento feito por FISCHER et alli (1979) para chegar à equação de dispersão uni-dimensional. Tendo em vista a utilização desta equação que será feita neste trabalho, a dispersão longitudinal será considerada homogênea ao longo dos trechos de rio em que o modelo for aplicado.

1 - Transporte difusivo

A Lei de Fick descreve o processo de difusão molecular, cuja importância se dá apenas em escalas microscópicas. Entretanto, na maioria dos casos, a dispersão em escoamentos naturais pode ser descrita por processos que são semelhantes à difusão molecular, porém em uma escala muito maior.

Essa lei estabelece que o fluxo de massa dissolvida, ou seja, a massa de um soluto que atravessa uma unidade de área numa unidade de tempo numa dada direção, é proporcional ao gradiente de concentração do soluto naquela direção. Num processo de difusão uni-dimensional, isso pode ser expresso matematicamente como:

$$f = - D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (\text{II.1})$$

onde: f = fluxo de massa dissolvida (M/L^2T)
 D = coeficiente de difusão molecular (L^2/T)
 c = concentração pontual instantânea (M/L^3)
 x = coordenada cartesiana da direção do fluxo (L)

Aplicando a lei de conservação de massa a um volume de controle de largura Δx num fluido em repouso no qual só ocorra transporte de massa na direção x , decorre que a taxa temporal de variação de massa nesse volume deve ser igual à diferença entre o fluxo de massa que entra e o que sai do volume de controle. Logo,

$$\frac{\partial c}{\partial t} \Delta x = f \Delta x - (f \Delta x + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x) \quad (\text{II.2})$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial x} = 0 \quad (\text{II.3})$$

onde: t = tempo (T)

Considerando o processo de difusão molecular homogêneo, com as equações (II.1) e (II.3), obtém-se:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right) \quad (\text{II.4})$$

Esta equação é conhecida como a "equação de difusão".

A solução fundamental para a equação (II.4) é aquela que descreve o espalhamento de uma quantidade inicial de massa M por unidades de área no plano yz introduzida no tempo zero na origem de x . Essa condição inicial pode ser escrita como:

$$c(x, 0) = M \delta(x)$$

onde: $\delta(x)$ = função delta de Dirac

Considerando o domínio em x infinito em ambas as direções, tem-se a solução da equação (II.4):

$$c(x, t) = \frac{M}{\sqrt{4 \pi D t}} \exp \left[- \frac{x^2}{4 D t} \right] \quad (\text{II.5})$$

A distribuição de concentrações fornecida pela equação (II.5) tem a forma da distribuição de Gauss.

Uma propriedade da equação (II.4) é o aumento linear da variância de uma distribuição de concentrações. De fato, multiplicando cada lado da equação (II.4) por x^2 e integrando de $x = -\infty$ até $x = +\infty$ obtém-se:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial c}{\partial t} x^2 dx = \int_{-\infty}^{\infty} D x^2 \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} dx$$

No lado esquerdo desta equação, a derivada no tempo pode ser retirada da integral, enquanto o lado direito pode ser integrado por partes obtendo-se assim:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{-\infty}^{\infty} c x^2 dx = 2 D \int_{-\infty}^{\infty} c dx \quad (\text{II.6})$$

Da definição de variância pelos momentos da distribuição, tem-se:

$$\sigma_x^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{m})^2 c \, dx}{\int_{-\infty}^{\infty} c \, dx} \quad (\text{II.7})$$

onde: σ_x^2 = variância da distribuição de concentrações
 \bar{m} = média da distribuição de concentrações

Uma vez que a posição da média é constante, ela pode ser tomada sem perda de generalidade em $x = 0$. A equação (II.7) se reduz a:

$$\sigma_x^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x^2 c \, dx}{\int_{-\infty}^{\infty} c \, dx} \quad (\text{II.8})$$

Combinando as equações (II.6) e (II.8), tem-se:

$$\frac{\partial \sigma_x^2}{\partial t} = 2 D \quad (\text{II.9})$$

Essa equação estabelece que, num processo de difusão homogêneo, a variância de uma distribuição finita de concentrações aumenta na taxa $2 D$, não importando qual a sua forma. Esse resultado será necessário mais tarde, quando for definido um "coeficiente de difusão turbulenta".

Para um sistema tri-dimensional isotrópico, a equação (II.4) é generalizada por:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II.10})$$

onde: y = coordenada cartesiana na direção da largura da seção (L)

z = coordenada cartesiana na direção da profundidade da seção (L).

A equação (II.10) descreve a difusão da massa num fluido em repouso; no próximo item será tratado o caso de fluido em movimento.

2 - Transporte advectivo:

Suponha-se que o fluido se mova com velocidade vetorial u , cujas componentes pontuais e instantâneas nas direções x , y e z são respectivamente u , v e w . O transporte de massa provocado pelo movimento do fluido é chamado advecção e supõe-se que os transportes por difusão e por advecção são distintos e aditivos. Trataremos neste item apenas de difusão molecular em escoamento laminar, logo o coeficiente de difusão tem o mesmo valor D em todas as direções.

A taxa de transporte de massa através de uma unidade de área no plano yz provocada pela componente da velocidade na direção de x é dada por:

$$u \, c \quad (II.11)$$

A taxa total de transporte de massa é dada pela parcela de advecção somada à parcela de difusão:

$$f = u \, c + \left(- D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (II.12)$$

Substituindo esse resultado na equação de conservação de massa uni-dimensional (equação (II.3)), obtem-se:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial (uc)}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (II.13)$$

Para um sistema tri-dimensional, generalizando-se a equação (II.13), obtem-se:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = D \left[\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] \quad (\text{II.14})$$

As equações (II.13) e (II.14), por tratarem de difusão molecular, têm pouca aplicabilidade a escoamentos naturais, que normalmente são turbulentos.

3 - Difusão Turbulenta

TAYLOR (1954), em um clássico estudo sobre a difusão, mostrou que decorrido um certo tempo, a variância de uma distribuição de partículas (como as de um soluto num fluido) num escoamento turbulento homogêneo e estacionário cresce linearmente com o tempo. Neste estudo é sugerido que se pode definir um coeficiente de misturamento turbulento, de maneira análoga ao coeficiente de difusão molecular.

O crescimento linear da variância é uma condição necessária para a equação de difusão ser aplicada, mas não é suficiente. Por outro lado, a velocidade de uma partícula de soluto num fluxo turbulento, $u(t)$, é uma variável aleatória para qualquer tempo t . Então a posição da partícula, $X(t) = \int_0^t u(t) dt$, é uma soma de variáveis aleatórias. O teorema do limite central da teoria de probabilidade estabelece que tais somas se aproximam da distribuição normal quando t tende ao infinito, desde que a variável $u(t)$ satisfaça certos requisitos de independência. É razoável, embora não provado, que um campo de velocidades turbulento homogêneo e estacionário satisfaça esses requisitos, podendo-se esperar que $X(t)$ se torne uma variável aleatória normal ou gaussiana para tempos grandes.

Uma vez que a posição de uma partícula é uma variável aleatória gaussiana, a distribuição de concentrações, por ser proporcional à posição de um grupo de partículas, também obedece à distribuição de Gauss. Assim, uma equação análoga à equação de difusão (que, como visto, tem por solução uma distribuição de concentrações gaussiana) deve descrever o

fenômeno de difusão turbulenta. A forma tri-dimensional mais simples da equação de difusão turbulenta é:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + E_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (\text{II.15})$$

onde: E_x , E_y e E_z = coeficientes de difusão turbulenta nas direções x , y e z (L^2/T)

C = concentração pontual média no tempo (M/L^3)

Uma comparação com a equação de difusão (equação (II.4)) mostra que E_x , E_y e E_z são os coeficientes turbulentos equivalentes aos coeficientes de difusão molecular, ou seja, as constantes na relação em que o fluxo de massa é proporcional ao gradiente de concentração.

A equação (I.15) foi escrita para velocidade média de escoamento igual a zero, como na análise de Taylor. Considerando-se um fluido em movimento e levando-se em conta que a turbulência normalmente não é homogênea, a equação de advecção-difusão de uma substância conservativa em um escoamento turbulento pode ser generalizada como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} + W \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(E_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (\text{II.16})$$

onde: U = velocidade média no tempo na direção x (L/T)

V = velocidade média no tempo na direção y (L/T)

W = velocidade média no tempo na direção z (L/T)

4 - Dispersão em escoamento cisalhante

Num escoamento natural, o espalhamento de um soluto na direção do fluxo é causado principalmente pelo perfil de velocidades na seção transversal. Escoamentos com tais

gradientes de velocidade são chamados de "escoamentos cisalhantes".

Em muitos escoamentos naturais, o misturamento ao longo da profundidade é alcançado rapidamente se comparado ao misturamento lateral, ou seja, pode-se considerar o fluxo como bi-dimensional xy (veremos mais tarde que no caso de dispersão em rios, essa é uma hipótese bastante razoável). Assim, a equação (II.16) é transformada para médias na profundidade:

$$\frac{\partial C_v}{\partial t} + U_v \frac{\partial C_v}{\partial x} + V_v \frac{\partial C_v}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial C_v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial C_v}{\partial y} \right) \quad (\text{II.17})$$

onde: C_v = concentração média na vertical (M/L^3)

U_v = velocidade média na vertical na direção x (L/T)

V_v = velocidade média na vertical na direção y (L/T)

ϵ_x = coeficiente de difusão médio na vertical na direção x (L^2/T)

ϵ_y = coeficiente de difusão médio na vertical na direção y (L^2/T)

Uma vez que num rio o fluxo se dá predominantemente na direção x (considerada concordante com o eixo do rio), pode-se desconsiderar as correntes secundárias na direção y (transversal a x). Após um tempo longo o suficiente para garantir que os gradientes de concentração na direção do fluxo são bem inferiores aos gradientes de concentração na direção transversal tem-se:

$$\frac{\partial C_v}{\partial t} + U_v \frac{\partial C_v}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial C_v}{\partial y} \right) \quad (\text{II.18})$$

Sejam as seguintes substituições na equação acima:

$$C_v = \bar{C} + C'$$

$$U_v = \bar{u} + u'$$

onde: \bar{C} = média da concentração na seção transversal (M/L^3)

C' = desvio da concentração em relação a \bar{C} (M/L³)

\bar{u} = média da velocidade na seção transversal (L/T)

u' = desvio da velocidade em relação a \bar{u} (L/T)

A equação (II.18) transforma-se em:

$$\frac{\partial (\bar{C} + C')}{\partial t} + (\bar{u} + u') \frac{\partial (\bar{C} + C')}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial (\bar{C} + C')}{\partial y} \right) \quad (\text{II.19})$$

Esta equação pode ser simplificada por uma transformação para um sistema de coordenadas móveis cuja origem se move com a velocidade média do escoamento.

Sejam:

$$\xi = x - \bar{u}t$$

$$\tau = t$$

onde: ξ = coordenada cartesiana na direção do fluxo num sistema que se move com a velocidade média (L)

τ = tempo neste sistema móvel (T)

Pela regra da cadeia pode-se escrever:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} &= \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial \tau}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial t} &= \frac{\partial \xi}{\partial t} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial \tau}{\partial t} \frac{\partial}{\partial \tau} = -\bar{u} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial \tau} \end{aligned}$$

A equação (II.19) pode assim ser reescrita (note que u' e C' são desvios espaciais e não temporais):

$$\frac{\partial (\bar{C} + C')}{\partial \tau} + u' \frac{\partial (\bar{C} + C')}{\partial \xi} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial C'}{\partial y} \right) \quad (\text{II.20})$$

TAYLOR (1953) propôs uma série de simplificações nesta equação, abandonando três dos quatro primeiros termos e obtendo uma solução analítica. Fischer, ao comentar essas simplificações propostas, diz que são originadas das ordens de grandeza dos termos envolvidos, ou seja:

- se C' é muito menor do que \bar{C} em qualquer ponto da seção transversal, os termos $\frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau}$ e $u' \frac{\partial C'}{\partial \xi}$ são muito menores do que $u' \frac{\partial \bar{C}}{\partial \xi}$ e podem ser desprezados, obtendo-se:

$$\frac{\partial C'}{\partial \tau} + u' \frac{\partial \bar{C}}{\partial \xi} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial C'}{\partial y} \right) \quad (\text{II.21})$$

- caso decorra um tempo suficientemente longo, nota-se que a distribuição de soluto estende-se sobre uma grande distância na direção x , \bar{C} varia lentamente ao longo do canal e $\frac{\partial \bar{C}}{\partial \xi}$ é essencialmente constante sobre um longo período de tempo; C' se torna pequeno, pois a difusão na seção transversal suaviza os gradientes de concentração. Deste modo pode-se desprezar o primeiro termo da equação (II.21):

$$u' \frac{\partial \bar{C}}{\partial \xi} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial C'}{\partial y} \right) \quad (\text{II.22})$$

Esta equação tem por solução:

$$C'(y) = \frac{\partial \bar{C}}{\partial \xi} \int_0^y \frac{1}{\epsilon_y} \int_0^y u' dy dy + C'(0) \quad (\text{II.23})$$

O fluxo de massa numa seção transversal qualquer (relativo ao sistema de coordenadas que se move) é calculado pela equação:

$$\dot{M} = \int_0^w u' C' dy = \frac{\partial \bar{C}}{\partial \xi} \int_0^w u' \int_0^y \frac{1}{\epsilon_y} \int_0^y u' dy dy dy \quad (\text{II.24})$$

onde: \dot{M} = fluxo de massa de soluto (M/T.1/L)

w = largura da seção (L)

O termo $\int_0^w u' C'(0) dy = 0$, pois $\int_0^w u' dy = 0$

Da equação (II.24) decorre que o transporte total de

massa na direção do fluxo é proporcional ao gradiente de concentração nesta direção. Este resultado é análogo ao obtido para a difusão molecular; a grande diferença é que aqui ele foi derivado levando-se em conta a difusão na direção do fluxo devida a todo o campo de escoamento.

Por causa deste notável resultado, pode-se definir um coeficiente de dispersão em analogia ao coeficiente de difusão molecular, que nesse sistema bi-dimensional é descrito através da equação:

$$\dot{M} = - W D_L \frac{\partial \bar{C}}{\partial \xi} \quad (\text{II.25})$$

onde: D_L = coeficiente de dispersão longitudinal (L^2/T)

O coeficiente de dispersão D_L expressa o transporte adicional de massa decorrente da distribuição de velocidades, que não é representada no caso de um modelo uni-dimensional. Este coeficiente tem um efeito semelhante, para toda a seção transversal, que o coeficiente de difusão molecular tem para uma escala microscópica. Assim pode-se escrever uma equação de difusão uni-direcional para médias na seção transversal, no sistema de coordenadas móvel, como:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} = D_L \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial \xi^2} \quad (\text{II.26})$$

Comparando-se a equação (II.26) com a equação (II.4), nota-se que o processo de dispersão num sistema que se move com velocidade \bar{u} pode ser modelado analogamente ao processo de difusão em água parada. Assim, a equação (II.26) também apresenta a propriedade do aumento linear da variância de uma distribuição de concentrações.

Para retornar ao sistema de coordenadas fixas, deve-se reintroduzir o termo contendo a velocidade de advecção média, obtendo-se:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = D_L \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} \quad (\text{II.27})$$

Esta equação, conhecida como a "equação de dispersão uni-dimensional", é geralmente utilizada para descrever o fenômeno da dispersão em rios, supondo-se um escoamento com turbulência homogênea.

FISCHER (1966) mostrou que, para a equação (II.27) ser aplicável, é suficiente que C' seja muito menor do que \bar{C} , o que caracteriza o chamado "período difusivo" (onde o misturamento lateral estaria completo). O período inicial, quando o movimento das partículas do soluto depende da velocidade inicial e a advecção é o mecanismo dominante na distorção da forma da distribuição de soluto, é chamado de "período advectivo" (onde a equação (II.27) não se aplica).

Uma vez deduzida a equação desejada, trataremos das metodologias existentes para se determinar D_L .

II-1.2) Métodos de cálculo do coeficiente de dispersão longitudinal

Na bibliografia referente a dispersão longitudinal em rios são descritos basicamente três métodos para se determinar o valor de D_L : fórmulas empíricas, métodos analíticos e utilizando resultados de ensaios com traçadores.

1 - Fórmulas empíricas

Nas formulações empíricas apresentadas aqui, de uma forma geral, o coeficiente de dispersão longitudinal é calculado como o produto de um coeficiente adimensional por

parâmetros geométricos e dinâmicos médios do rio. Este coeficiente adimensional é normalmente obtido por análises estatísticas e considerações teóricas que têm por base dados experimentais obtidos em ensaios de laboratório ou de campo.

Serão discutidas apenas as formulações desenvolvidas para rios (não serão apresentadas as desenvolvidas para canais). São indicadas as unidades utilizadas na dedução de cada uma das fórmulas.

1.1 - Fórmula de MCQUIVEY e KEEFER (1974):

Estes autores propuseram a equação:

$$DL = 0,058 \frac{Q}{S W} \quad , \text{ para } F < 0,5 \quad (\text{II.28})$$

onde: DL = coeficiente de dispersão longitudinal (m^2/s)
 Q = vazão (m^3/s)
 S = gradiente de energia (adimensional)
 W = largura da seção (m)
 F = número de Froude (adimensional)

A restrição feita ao número de Froude se deve a um termo adicional da equação que assume valores muito pequenos e desprezíveis para $F < 0,5$. Como a grande maioria dos escoamentos naturais se encontra nessa faixa, essa restrição é muito pouco significativa.

Os autores derivaram a equação (II.28) estabelecendo uma analogia entre a equação de fluxo uni-dimensional:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + v_a \frac{\partial q}{\partial x} = k \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} \quad (\text{II.29})$$

onde: q = vazão por unidade de largura ($\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$)
 v_a = velocidade advectiva (m/s)
 k = coeficiente de dispersão de fluxo (m^2/s)

e a equação de dispersão uni-dimensional:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = D_L \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} \quad (\text{II.30})$$

A analogia feita entre os dois coeficientes é válida, uma vez que tanto a equação (II.29) quanto a equação (II.30) são obtidas admitindo-se que a lei de Fick descreva bem os fenômenos de dispersão de fluxo e de soluto.

Usando dados de quarenta estudos com traçadores realizados em dezoito rios dos E.U.A., verificou-se a analogia entre k e D_L e entre v_a e \bar{u} . As correlações encontradas foram satisfatórias, pois segundo esses autores os resultados obtidos com a equação (II.28) apresentaram um desvio padrão de 30% quando comparados com os resultados obtidos com o método de propagação desenvolvido por FISCHER (1968) (e que será descrito no item 3).

1.2 - Fórmula de FISCHER (1975):

Numa discussão do trabalho de McQuivey e Keefer, Fischer usou resultados analíticos previamente deduzidos por ELDER (1959) e TAYLOR (1953) para propor a equação:

$$D_L = \frac{0,07 \bar{u}'^2 \ell^2}{\epsilon_y}$$

onde: \bar{u}' = média dos desvios da velocidade em relação à velocidade média da seção (m/s)

ℓ = distância do ponto de velocidade máxima à margem mais distante (m)

ϵ_y = coeficiente de difusão transversal (m^2/s)

Foram feitas as seguintes considerações adicionais:

- utilizando resultados de experiências de laboratório realizadas por Fischer onde a razão \bar{u}'^2 / \bar{u}^2 variou de 0,17 a 0,25, foi escolhido o valor médio de 0,2.
- o valor de ℓ considerado razoável para rios é de $0,7W$ (pois num rio espera-se que ℓ esteja entre $0,5W$ e W).

- o valor de ϵy foi substituído por $0,6 \bar{d} u^*$; este é um valor médio obtido de ensaios de campo (como será visto no item II-2).

Tem-se assim a equação proposta para cálculo de D_L :

$$D_L = 0,011 \frac{\bar{u}^2 W^2}{\bar{d} u^*} \quad (\text{II.31})$$

onde: u^* = velocidade de cisalhamento (m/s)

\bar{d} = profundidade média (m)

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$$

onde: τ_0 = tensão de cisalhamento (ou fricção) exercida pelo escoamento turbulento sobre as paredes do canal (P)

ρ = densidade do fluido (Kg/m^3)

Fazendo o balanço das forças que atuam na parede do canal, pode-se demonstrar que para um escoamento uniforme num canal aberto tem-se:

$$u^* = \sqrt{g R S}$$

onde: R = raio hidráulico (m)

g = aceleração da gravidade (m/s^2)

Para rios com largura superior a vinte vezes a profundidade média, o raio hidráulico é aproximadamente igual à profundidade média, logo:

$$u^* = \sqrt{g \bar{d} S}$$

Comparando os resultados obtidos com a equação (II.31) e os obtidos de dezesseis ensaios com traçadores, Fischer conclui que a equação (II.31) não leva a resultados precisos, mas apenas à ordem de grandeza do valor de D_L . Afirma ainda que, na prática, é aceitável que D_L apresente erro de até

400%, pois as distribuições de concentrações geralmente não são sensíveis ao valor de DL .

1.3 - Fórmula de LIU (1977):

Liu propôs a seguinte equação para previsão de DL :

$$DL = \beta \frac{Q^2}{u^* R^3} \quad (II.32)$$

onde:

$$\beta = 0,5 \left(\frac{u^*}{\bar{u}} \right) \quad (II.33)$$

A equação (II.33) só foi proposta em LIU (1978).

Combinando as equações (II.32) e (II.33), fazendo $Q = \bar{u}A$ e considerando-se que R é aproximadamente igual a \bar{d} , tem-se:

$$DL = 0,5 \frac{u^* A^2}{\bar{d}^3}$$

onde: A = área da seção transversal (m^2)

Liu utilizou como base para seu estudo uma equação deduzida por FISCHER (1967) para dispersão dominada por variação lateral da velocidade (equação (II.38)). Fazendo substituições de variáveis adimensionais na equação de Fischer, chegou à equação (I.32) e a uma equação analítica para o cálculo de β que, por ser baseada na equação de Fischer, supõe implicitamente um canal relativamente reto e de seção prismática.

Como a quase totalidade dos rios é sinuosa, contendo ainda contrações e expansões, zonas mortas, ilhas, etc, e esses fatores não apenas incrementam a dispersão mas também aumentam a resistência ao escoamento, Liu sugere a existência de uma correlação entre o coeficiente de dispersão adimensional β , e o fator de resistência f da fórmula de Darcy-Weisbach. Por razões práticas, Liu encontrou uma

correlação entre β e u^*/\bar{u} ($= \sqrt{f/8}$) ao invés de f .

Foram usados dados de quatorze ensaios com traçadores realizados nos E.U.A. para testar os valores calculados pela equação II.32. O máximo desvio absoluto encontrado de um ponto experimental é menor do que seis vezes o valor de D_L calculado por esta equação. Valores de D_L dentro dessa faixa de variação é que Liu considera possíveis de serem obtidos com a formulação proposta.

1.4 - Fórmula de PETERSEN (1977):

Ao propor uma metodologia de cálculo dos parâmetros de um modelo de dispersão que contempla zonas mortas (não-fickiano), Petersen deduziu a seguinte equação:

$$D_L = C_k \frac{W^2}{\bar{d}} u^* \quad (\text{II.34})$$

onde: C_k = parâmetro adimensional

Petersen, embora num trabalho completamente independente, desenvolveu a equação (II.34) de modo análogo à equação (II.32) deduzida por Liu, ou seja, usou como base a equação deduzida por FISCHER (1967) e efetuou substituições de variáveis adimensionais.

Petersen afirma que por inspeção da equação (II.34), pode-se concluir que uma aproximação analítica (baseada em hipóteses razoáveis da distribuição de velocidades e do coeficiente de difusão turbulenta) forneceria um valor de C_k em função apenas da geometria. Segundo ele, a complexidade da hidrodinâmica dos escoamentos naturais proíbe tal aproximação analítica para estimar C_k .

Petersen diz que, devido à interação dos efeitos envolvidos, é bem provável que uma análise estatística baseada numa correlação entre C_k e parâmetros geométricos e dinâmicos mostre bons resultados. Infelizmente os dados

disponíveis têm falhas de informações detalhadas que possibilitariam tal análise. Dos vinte casos analisados por Petersen, o único que mostrou erro pronunciado para um valor de C_k de 0,2 foi o do rio Missouri.

2 - Métodos Analíticos:

Nesta seção serão discutidos os métodos que fazem previsões analíticas do coeficiente de dispersão longitudinal. Estas formulações são baseadas na equação de dispersão uni-dimensional e contêm diversas hipóteses simplificadoras do mecanismo hidrodinâmico que resulta em dispersão, uma vez que se deseja obter um resultado de uso prático. Serão mostradas essas hipóteses nos dois métodos mais conhecidos.

2.1 - Método de Fischer:

FISCHER (1967) desenvolveu uma metodologia baseada no modelo de dispersão proposto por Taylor fazendo uma modificação básica em relação ao modelo proposto. Enquanto num tubo (solução de TAYLOR (1954)) a dispersão é causada por diferenças na velocidade na direção radial e num escoamento bi-dimensional infinitamente largo (solução de ELDER (1959)) a causa é a variação da velocidade da superfície do escoamento até o fundo (perfil vertical de velocidades longitudinais), em escoamentos naturais a principal causa da dispersão são as diferenças na velocidade na direção transversal ao fluxo.

Em rios, a variação relativa da velocidade nas direções lateral (y) e vertical (z) é a mesma (ou seja, de um valor máximo até zero), mas por causa da maioria dos rios ter a largura maior do que dez vezes a profundidade, a separação entre zonas de velocidades diferentes é muito maior na direção lateral do que na vertical. Segundo Fischer, uma vez

que o misturamento entre zonas de diferentes velocidades varia com o quadrado da distância entre elas, espera-se que a contribuição do perfil de velocidades transversal na produção de dispersão longitudinal seja pelo menos cem vezes maior do que a proveniente do perfil vertical.

Fischer obteve sua estimativa para o coeficiente de dispersão longitudinal desprezando completamente a influência do perfil vertical e aplicando a análise de Taylor ao perfil de velocidades transversal.

Seja:

$$u'(y) = \bar{u}^z(y) - \bar{u}$$

onde:

$$\bar{u}^z(y) = \frac{1}{d(y)} \int_{-d}^0 u(y, z) dz$$

$\bar{u}^z(y)$ é o perfil transversal das velocidades médias na profundidade, onde:

d = profundidade (L)

$d(y)$ = perfil transversal de profundidades

O balanço entre advecção e difusão representado pela equação (II.22) fornece neste caso:

$$\int_0^y u'(y) d(y) \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} dy = d \epsilon_y \frac{\partial C'}{\partial y} \quad (\text{II.35})$$

Esta equação tem por solução:

$$C'(y) = \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \int_0^y \frac{1}{\epsilon_y d} \int_0^y u' d dy dy + C'(0)$$

O transporte de massa na direção do fluxo é obtido por:

$$\dot{M} = \int_A u' C' dA = \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \int_0^w u' d \int_0^y \frac{1}{\epsilon_y d} \int_0^y u' d dy dy dy \quad (\text{II.36})$$

Da definição do coeficiente de dispersão longitudinal em analogia à do coeficiente de difusão molecular tem-se:

$$\dot{M} = - D_L A \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \quad (\text{II.37})$$

Das equações (II.36) e (II.37), obtem-se:

$$D_L = - \frac{1}{A} \int_0^w u' d \int_0^y \frac{1}{\varepsilon_y d} \int_0^y u' d dy dy dy \quad (\text{II.38})$$

Fischer afirma que este resultado deve ser encarado como uma estimativa, pois é baseado no conceito de escoamento uniforme numa seção transversal constante ao longo do rio.

2.2 - Método de JAIN (1976):

Este método foi desenvolvido fazendo-se simplificações no método de Fischer, de modo a se obter uma formulação que não utilizasse o perfil de velocidades. Desse modo, esta metodologia pode ser aplicada para se obter uma estimativa rápida do coeficiente de dispersão longitudinal que permita estudos preliminares em locais onde não existam dados do perfil de velocidades.

Foi utilizada a equação (II.38) escrita na forma:

$$D_L = - \frac{1}{A} \int_0^w q'(y) dy \int_0^y \frac{dy}{\varepsilon_y(y) d(y)} \int_0^y q'(y) dy \quad (\text{II.39})$$

na qual: $q' = \int_0^{d(y)} u'(y, z) dz$ (II.40)

onde: q' = vazão por unidade de largura integrada ao longo da profundidade num ponto y (L^2/T)

A fim de normalizar a equação (II.39), define-se:

$$\frac{z}{\bar{d}} = z'', \quad \frac{y}{W} = y'', \quad \frac{u}{\bar{u}} = u'', \quad \frac{q}{\bar{q}} = q'' \quad \text{e} \quad \frac{d}{\bar{d}} = d'' \quad (\text{II.41})$$

onde: q = vazão local por unidade de largura (L^2/T)
 $\bar{q} = \frac{Q}{W}$ = vazão por unidade de largura média na seção transversal (L^2/T)
 \bar{u} = velocidade média (L/T)

A equação (II.40) pode ser escrita como:

$$q' = \int_0^{d(y)} (u - \bar{u}) dz = \bar{u} \bar{d} [q''(y'') - d''(y'')] \quad (\text{II.42})$$

Para se avaliar o valor de $\varepsilon_y(y)$ foi utilizado o modelo simplificado dado pela equação (que será visto em detalhe na seção II-2):

$$\varepsilon_y(y) = \alpha u^* \bar{d} \quad (\text{II.43})$$

onde: α = constante de proporcionalidade (adimensional)

Substituindo as equações (II.41), (II.42) e (II.43) em (II.40) obtém-se:

$$D_L = \beta \frac{\bar{u}^2 W^3}{\alpha A u^*} \quad (\text{II.44})$$

onde:

$$\beta = - \int_0^1 (q'' - d'') \int_0^{y''} d''^{-2} \int_0^{y''} (q'' - d'') dy'' dy'' dy'' \quad (\text{II.45})$$

Para simplificar essa equação, Jain introduziu uma relação obtida para diversos escoamentos naturais:

$$\frac{q}{\bar{q}} = \left(\frac{d}{\bar{d}} \right)^{5/3} \quad \text{para} \quad \frac{W}{\bar{d}} > 50 \quad (\text{II.46})$$

Substituindo a equação (II.46) na (II.45), obtém-se:

$$\beta = - \int_0^1 (d''^{5/3} - d'') \int_0^{y''} d''^{-2} \int_0^{y''} (d''^{5/3} - d'') dy'' dy'' dy'' \quad (\text{II.47})$$

O valor de β dado por essa equação é função apenas da forma da seção transversal do rio. Para uma dada seção transversal, β pode ser determinado pela equação (II.47), que substituído na equação (II.44) fornece o valor do coeficiente de dispersão longitudinal.

De modo a simplificar a utilização do método, foi proposta uma seção transversal típica como a mostrada na Figura II.1. Nesta figura, n e m são as declividades das margens, d_1 é a profundidade na margem mais rasa, d_2 é a profundidade na margem mais profunda, W é a largura da seção no nível d'água e W_f é a largura no fundo da seção.

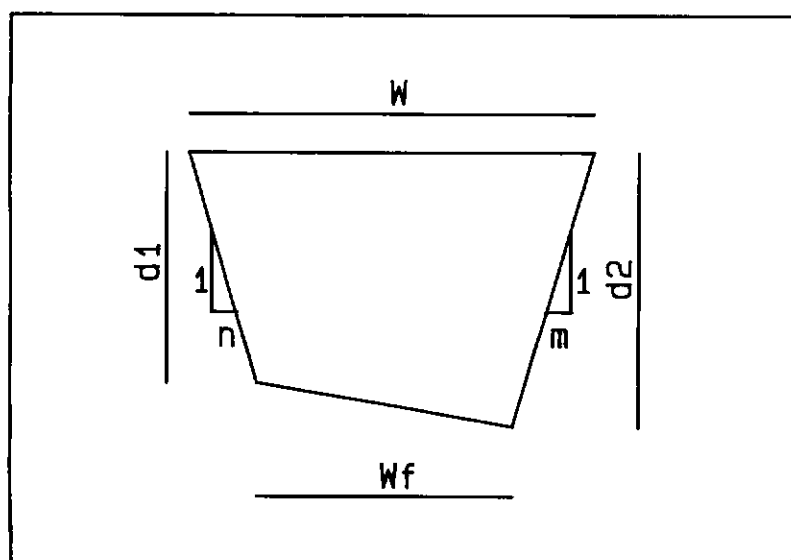


Figura II.1 : Seção transversal utilizada no método de Jain.

Com os valores definidos, pode-se calcular as grandezas normalizadas:

$$d_1'' = \frac{d_1}{\bar{d}} ; d_2 = \frac{d_2}{\bar{d}} ; n'' = n \frac{\bar{d}}{W} ; m'' = m \frac{\bar{d}}{W} ; d_2 > d_1$$

onde: n'' = declividade normalizada na margem mais rasa
 d_1'' = profundidade normalizada na margem mais rasa
 m'' = declividade normalizada na margem mais profunda
 d_2'' = profundidade normalizada na margem mais profunda

Para a maioria das seções transversais de rios, o valor das declividades normalizadas está entre 0,0 e 0,2. Assim, foram construídos gráficos correlacionando d_1'' , n'' , m'' e β para a seção normalizada. Com os valores de d_1'' , n'' e m'' , consulta-se o gráfico para obter β ao invés de realizar a integração da equação (II.47).

No seu trabalho, Jain apresenta ainda uma série de equações para o cálculo de β da seção normalizada em função de d_1'' , d_2'' , n'' e m'' . Uma série de testes realizados nesta tese indicam que deve haver alguma falha na derivação dessas equações ou na apresentação do artigo, uma vez que sua utilização levou a resultados diferentes dos encontrados nos gráficos (até mesmo a valores de β negativos). Já a integração numérica da equação (II.47) para a seção transversal normalizada reproduziu exatamente os gráficos apresentados no trabalho de Jain.

3 - Métodos com uso de traçador

Denominou-se aqui de "métodos com uso de traçador" aqueles que utilizam as distribuições de concentrações obtidas em ensaios de dispersão longitudinal realizados com traçador para calcular o coeficiente de dispersão longitudinal (estes ensaios serão vistos no Capítulo II). Todos estes métodos são baseados no modelo de dispersão uni-dimensional, portanto as distribuições de concentrações utilizadas devem ser obtidas em locais onde tanto o

misturamento vertical quanto o transversal tenham sido alcançados. Como estes métodos utilizam uma distribuição de concentrações de montante e uma de jusante num determinado trecho de rio, o valor de D_L obtido é um valor médio representativo da dispersão ao longo do trecho monitorado e é considerado constante para este trecho. Nesta seção trataremos das três metodologias mais utilizadas, o método de Variação dos Momentos, o ajuste com uma solução da equação de dispersão uni-dimensional e o ajuste com o método de convolução.

3.1 - Método de Variação dos Momentos

Admitindo-se que o valor de D_L é constante num trecho de rio, conforme visto no item II-1.1 a equação de dispersão uni-dimensional, para este trecho, apresenta a propriedade de aumento linear da variância de uma distribuição de concentrações. Este método supõe o aumento linear da variância fazendo a seguinte transformação:

$$\sigma_x^2 = \bar{u}^2 \sigma_t^2 \quad (\text{II.48})$$

onde: σ_t^2 = variância da distribuição de concentrações em relação a t (T^2)

Tal transformação é necessária, uma vez que os resultados dos ensaios com traçador são distribuições de concentrações versus tempo numa dada seção. A equação (II.48) deve ser aplicada quando a velocidade na seção de monitoramento permanece constante e pode-se demonstrar que leva a bons resultados quando o número de Peclet ($L \bar{u}/D_L$) é grande, ou seja, o escoamento é dominado principalmente pela advecção (SAYRE e CHANG (1968)). Disso decorre a hipótese de "nuvem fixa", ou seja, que a distribuição que está se dispersando praticamente não muda seu formato durante seu tempo de passagem na seção de monitoramento.

Substituindo a equação (II.48) na equação (II.9) e

aplicando-a a duas seções do rio tem-se:

$$D_L = \frac{1}{2} \bar{u}^2 \frac{\sigma_{t_2}^2 - \sigma_{t_1}^2}{\bar{t}_2 - \bar{t}_1} \quad (\text{II.49})$$

onde: \bar{t} = tempo médio de passagem da distribuição de traçador na seção de monitoramento (T).

Os índices 1 e 2 indicam respectivamente as seções de monitoramento de montante e de jusante. O valor da velocidade utilizado na equação (II.49) pode ser calculado a partir da distância entre as seções de monitoramento e do intervalo de tempo $(\bar{t}_2 - \bar{t}_1)$ que o centro de gravidade da distribuição de concentrações leva para percorrer esta distância.

3.2 - Ajuste com uma solução da equação de dispersão uni-dimensional

Neste método, chamado neste trabalho de "Solução de Taylor", uma distribuição de concentrações versus tempo para a seção de jusante é gerada a partir de uma solução da equação de dispersão uni-dimensional, onde a distribuição experimental da seção de montante é utilizada como distribuição inicial. O coeficiente de dispersão longitudinal é determinado pelo ajuste entre a curva gerada e a curva experimental de jusante, levando-se em conta um critério de precisão pré-estabelecido. Uma crítica ao ajuste leva à escolha de um novo coeficiente e assim sucessivamente até que se atinja a precisão desejada.

Foi utilizada neste estudo a solução da equação de dispersão uni-dimensional para a seguinte condição inicial:

$$C(x, 0) = \delta(x) \frac{M}{A}$$

onde: $\delta(x)$ = função delta de Dirac

Esta condição inicial equivale a uma injeção planar instantânea uniformemente distribuída ao longo da seção transversal (ou seja, uma quantidade de massa M concentrada num espaço infinitamente pequeno) no tempo $t = 0$ e na origem do eixo x .

As condições de contorno são:

$$C(\infty, t) = 0 \quad e$$

$$C(0, t) = 0 \quad \text{para } t > 0$$

A solução procurada, também conhecida como equação de Taylor, é a seguinte:

$$C(x, t) = \frac{M}{2 A \sqrt{\pi D_L t}} \exp \left[- \frac{(x - \bar{u} t)^2}{4 D_L t} \right] \quad (\text{II.50})$$

Esta equação apresenta um inconveniente para sua utilização, que é a existência da área de escoamento no denominador. Num escoamento natural, a área pode variar bastante, e seria necessário o levantamento de um grande número delas para se obter a uma área média (pois a condição inicial admite uma seção constante). Para contornar este problema, são feitas algumas substituições na equação (II.50). Aplicando-se a lei de conservação de massa a uma distribuição de concentrações proveniente do lançamento de uma quantidade de massa M num rio, tem-se:

$$\int_{-\infty}^{\infty} C \, dt = \frac{M}{Q} \quad (\text{II.51})$$

O lado esquerdo da equação (II.51) é a área sob a distribuição de concentrações versus tempo na seção de monitoramento. Da equação da continuidade tem-se:

$$Q = \bar{u} A \quad (\text{II.52})$$

Das equações (II.51) e (II.52) obtem-se:

$$A = \frac{M}{\int_{-\infty}^{\infty} C \, dt} \quad (\text{II.53})$$

Substituindo a equação (II.53) na equação (II.50) tem-se:

$$C(x, t) = \frac{\bar{u} \int_{-\infty}^{\infty} C \, dt}{2 \sqrt{\pi D_L t}} \exp \left[- \frac{(x - \bar{u} t)^2}{4 D_L t} \right]$$

Utilizando-se esta equação, a distribuição de concentrações para a seção de jusante pode ser gerada conhecendo-se a área sob a distribuição de montante:

$$C(X_2, t) = \frac{\bar{u} \int_{-\infty}^{\infty} C(X_1, \tau) \, d\tau}{2 \sqrt{\pi D_L t}} \exp \left[- \frac{(Ax - \bar{u} t)^2}{4 D_L t} \right] \quad (\text{II.54})$$

onde: X_1 = posição da seção de montante (L)

X_2 = posição da seção de jusante (L)

Ax = distância entre as seções (L)

τ = tempo correspondente à distribuição de concentrações de montante (T)

t = tempo correspondente à distribuição de concentrações de jusante (T)

3.3 - Métodos de convolução

Foram denominados neste trabalho de "métodos de convolução" aqueles que geram uma distribuição de concentrações versus tempo para a seção de jusante usando o princípio de convolução, tendo a distribuição experimental da seção de montante como distribuição inicial. O coeficiente de dispersão longitudinal é determinado pelo melhor ajuste entre a curva gerada e a curva experimental da seção de jusante.

A técnica matemática de convolução pode ser entendida

fisicamente como uma metodologia para calcular as distribuições de concentrações parciais na seção de jusante provenientes de cada pequena parcela de massa existente na distribuição de concentrações de montante e somar todas essas contribuições para formar a distribuição de concentrações total na seção de jusante. Esta separação da massa total correspondente à distribuição de concentrações de montante em pequenas parcelas (como se a distribuição de montante fosse composta por uma série de injeções separadas) pode ser feita porque, num rio, é razoável supor que o movimento de uma partícula de soluto é independente das outras partículas à sua volta.

Serão analisados nesta seção dois métodos que utilizam a convolução, o primeiro chamado "Método de Propagação de Fischer" (desenvolvido por FISCHER (1968)) e o segundo obtido a partir de uma solução da equação de dispersão uni-dimensional.

3.3.1 - Método de Propagação de Fischer

Fischer deduziu este método partindo de uma solução para a equação de difusão para as seguintes condições inicial e de contorno:

$$C(x, 0) = f(x)$$

$$C(\infty, t) = 0$$

onde: $f(x)$ = função arbitrária

Se admitirmos que esta função arbitrária é composta por uma série de pequenas injeções separadas de largura $d\xi$ e com massa especificada pelo valor de $f(\xi)$, cada injeção contém uma massa $M = f(\xi) d\xi$. Assim, a concentração num único ponto x_1 e tempo t_1 resultante da injeção centrada em ξ , com largura $d\xi$ e altura $f(\xi)$ é calculada por:

$$C(x_1, t_1) = \frac{f(\xi) d\xi}{\sqrt{4 \pi D_L t}} \exp \left[- \frac{(x - \xi)^2}{4 D_L t} \right] \quad (\text{II.55})$$

A contribuição total em x e t de todas as pequenas injeções é a soma integral de todas as contribuições individuais, ou seja:

$$C(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\xi)}{\sqrt{4 \pi D_L t}} \exp \left[- \frac{(x - \xi)^2}{4 D_L t} \right] d\xi \quad (\text{II.56})$$

A equação (I.56) é uma integral de convolução. Fischer obteve a equação final do seu método supondo a hipótese de "nuvem fixa", ou seja, que a distribuição que está se dispersando praticamente não muda seu formato durante seu tempo de passagem na seção de monitoramento. Deste modo, tem-se:

$$C(X_1, t) \approx C(x, \bar{t}_1)$$

com

$$x - X_1 = \bar{u} (\bar{t}_1 - t)$$

onde: X_1 = posição da seção de monitoramento (L)

\bar{t}_1 = tempo correspondente à passagem do centro de gravidade da distribuição de concentrações pela seção de monitoramento (T)

Fazendo estas substituições na equação (II.56) tem-se a equação proposta por Fischer:

$$C(X_2, t) = \int_{-\infty}^{\infty} C(X_1, \tau) \frac{\exp \left[- \frac{\{ \bar{u} (\bar{t}_2 - \bar{t}_1 - t + \tau) \}^2}{4 D_L (\bar{t}_2 - \bar{t}_1)} \right]}{\sqrt{4 \pi D_L (\bar{t}_2 - \bar{t}_1)}} \bar{u} d\tau \quad (\text{II.57})$$

Os índices 1 e 2 indicam respectivamente as seções de monitoramento de montante e de jusante.

3.3.2 - Convolução de uma solução da equação de dispersão uni-dimensional

Este método, aqui chamado de "Convolução de Solução Analítica, utiliza uma solução da equação de dispersão apresentada por GENUCHTEN e ALVES (1982) para as seguintes condições inicial e de contorno:

$$C(x, 0) = 0$$

$$C(0, t) = \begin{cases} C_0 & 0 \leq t \leq t_0 \\ 0 & t > t_0 \end{cases}$$

$$\frac{\partial C}{\partial x}(\infty, t) = 0$$

A solução é a seguinte:

$$C(x, t) = \begin{cases} C_0 A(x, t) & 0 \leq t \leq t_0 \\ C_0 A(x, t) - C_0 A(x, t - t_0) & t > t_0 \end{cases} \quad (\text{II.58})$$

onde: C_0 = concentração de injeção (M/L^3)

t_0 = tempo de duração da injeção (T)

$$A(x, t) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{x - \bar{u} t}{\sqrt{4 D_L t}} \right] + \frac{1}{2} \exp \left(-\frac{\bar{u} x}{D_L} \right) \operatorname{erfc} \left[\frac{x + \bar{u} t}{\sqrt{4 D_L t}} \right] \quad (\text{I.59})$$

onde: $\operatorname{erfc}(x)$ = função erro complementar

Aplicando-se o princípio de convolução à equação (II.58) tem-se a equação utilizada neste trabalho:

$$C(X_2, t) = \begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} C(X_1, \tau) A(\Delta X, t-\tau) d\tau & \text{para } 0 \leq t-\tau \leq t_0 \\ \int_{-\infty}^{\infty} (C(X_1, \tau) A(\Delta X, t-\tau) - C(X_1, \tau) A(\Delta X, t-t_0-\tau)) d\tau & \text{para } t-\tau > t_0 \end{cases}$$

(II.61)

onde: ΔX = distância entre as seções de monitoramento (L)

II-2) Difusão transversal

Nesta seção será deduzida a equação diferencial parcial que foi utilizada neste trabalho para descrever o misturamento de solúveis na região do rio em que o misturamento vertical já foi alcançado e o misturamento lateral ainda não está completo. Serão apresentados também os métodos que foram utilizados para calcular o coeficiente de difusão transversal.

II-2.1) Equação de difusão transversal

A equação aqui denominada de "difusão transversal" foi obtida fazendo-se simplificações na equação de difusão turbulenta tri-dimensional (equação (II.16)) para torná-la adequada à região do rio em que o escoamento pode ser considerado como bidimensional xy. As simplificações efetuadas nesta dedução foram feitas com o intuito de se obter um modelo que, embora simplificado, permitisse a utilização dos dados obtidos no ensaio com traçador.

Deste modo, supondo as hipóteses utilizadas na dedução da equação (II.18), e considerando ainda que os valores de

velocidade, profundidade e ϵ_y são constantes ao longo da seção transversal, obtem-se:

$$\frac{\partial C_v}{\partial t} + U_v \frac{\partial C_v}{\partial x} = \epsilon_y \frac{\partial^2 C_v}{\partial y^2} \quad (\text{II.62})$$

ϵ_y , por ser o coeficiente que traduz o misturamento provocado pela turbulência na direção transversal ao escoamento, é chamado de coeficiente de difusão transversal.

II-2.2) Métodos de cálculo do coeficiente de difusão transversal

Uma vez que a comparação dos métodos de cálculo do coeficiente de difusão transversal não é um dos objetivos principais desta tese, serão apresentadas aqui apenas as metodologias que foram utilizadas para se determinar o valor de ϵ_y do rio Paraíba do Sul. Neste rio foi realizado um ensaio com traçador para se determinar ϵ_y porque, como visto no item II-1.2, alguns dos métodos existentes para cálculo do coeficiente de dispersão longitudinal utilizam o valor de ϵ_y calculado por uma fórmula empírica e desejava-se verificar se esta proporcionava uma boa aproximação.

1 - Fórmulas empíricas

ELDER (1959) desenvolveu uma equação teórica para cálculo do coeficiente de difusão vertical num canal uniforme infinitamente largo considerando que, neste tipo de escoamento, o perfil vertical de velocidades longitudinais é o principal responsável pela dispersão. Esta equação apresentava o coeficiente de difusão vertical como produto de uma constante de proporcionalidade por $u^* d$. Elder argumentou que, uma vez que essencialmente todo o misturamento em tais

escoamentos é gerado pelo perfil vertical de velocidades, o coeficiente de difusão transversal também devia ser proporcional a $u^* d$.

A formulação empírica mais conhecida para se estimar o coeficiente de difusão transversal é uma extensão deste resultado para escoamentos naturais, e que foi utilizada por vários autores na dedução dos métodos de cálculo do coeficiente de dispersão longitudinal apresentados no item II-1.2, ou seja:

$$\varepsilon_y = \alpha u^* \bar{d} \quad (\text{II.63})$$

onde: α = constante de proporcionalidade (adimensional)

FISCHER et alli (1979) diz que, para propósitos práticos, o valor de α pode assumir valores entre 0,4 e 0,8, sendo que os valores mais baixos devem ser aplicados a trechos de rio com poucas sinuosidades e moderadas irregularidades nas margens. Na dedução de sua fórmula empírica para cálculo do coeficiente de dispersão longitudinal, Fischer utilizou o valor médio de 0,6.

2 - Métodos com uso de traçador

Existem metodologias mais sofisticadas para cálculo do coeficiente de difusão transversal utilizando resultados de ensaios com traçador do que a descrita neste item, tais como as desenvolvidas por HOLLEY, SIEMONS e ABRAHAM (1972) e BELTAOS (1980). Estas metodologias não foram empregadas neste trabalho porque para sua utilização necessita-se também dos perfis de velocidades nas seções de monitoramento, e não foi possível levantar estes dados para o ensaio realizado.

Para uma injeção contínua de traçador, $\frac{\partial C_v}{\partial t} = 0$, logo da equação (II.62) tem-se:

$$U_v \frac{\partial C_v}{\partial x} = \epsilon_y \frac{\partial^2 C_v}{\partial y^2} \quad (\text{II.63})$$

Aplicando-se o Método dos Momentos à equação (II.63) pode-se mostrar (SAYRE e CHANG (1968), BELTAOS (1980)) que para as distribuições de concentrações que ainda não alcançaram as margens:

$$\epsilon_y = \frac{1}{2} U_v \frac{d\sigma_y^2}{dx} \quad (\text{II.64})$$

onde: σ_y^2 = variância da distribuição C versus y (L^2)

As hipóteses feitas para dedução da equação (II.64) (velocidade longitudinal constante ao longo da seção, inexistência de velocidades transversais, profundidade constante) são bastante restritivas, o que torna o valor de ϵ_y obtido com esse modelo simplificado apenas uma boa aproximação.

III - ENSAIOS DE DISPERSÃO LONGITUDINAL

Neste capítulo trataremos dos materiais e metodologias empregados nos ensaios realizados na bacia do rio Paraíba do Sul visando a determinação do coeficiente de dispersão longitudinal e da velocidade média de trânsito.

Um ensaio de dispersão longitudinal constitui-se basicamente do lançamento de um traçador no escoamento do rio e o acompanhamento das distribuições de concentração deste traçador com o tempo (curvas de passagem) em seções situadas a jusante da injeção (conforme descrito em HUBBARD, KILPATRIK, MARTENS e WILSON JR (1982)).

III-1) Traçadores

Os materiais utilizados neste trabalho como traçadores são substâncias orgânicas empregadas como corantes, sobretudo na indústria têxtil, e que são comercializados na forma de um pó muito fino. Essas substâncias apresentam a propriedade de fluorescência, ou seja, emitem luz (fluorescem) numa certa faixa de comprimentos de onda quando sobre elas incidimos luz (excitamos) numa faixa de comprimentos de onda a que elas são sensíveis.

O fato de substâncias fluorescentes serem bastante usadas em Hidrologia deve-se a vários fatores, tais como sua alta solubilidade em água, a facilidade de manuseio do material (sem os riscos inerentes ao trabalho com material radioativo) e a grande sensibilidade dos equipamentos que medem fluorescência (que permite o emprego de pequenas quantidades de traçador para marcar grandes volumes de água e a coleta de amostras de volume reduzido). Existem também fatores que potencialmente podem prejudicar a utilização de traçadores fluorescentes, tais como efeitos de temperatura,

reação química, biodegradação, pH e fotodecomposição. A ação desses fatores sobre o desempenho dos traçadores utilizados será vista com detalhes no Capítulo VII.

Neste trabalho foram utilizados os seguintes traçadores fluorescentes:

- Uranina ou Fluoresceína Sódica (Color Index = 45350)
- Amidorodamina G ou Sulforodamina G (Color Index = 45220)
- Sulforodamina B ou Amidorodamina B (Color Index = 45100).

O Color Index é um identificador utilizado na indústria de corantes, uma vez que diferentes fabricantes fornecem o mesmo produto com nomes diferentes.

III-2) Procedimentos de campo

O resultado imediato que se deseja de um ensaio de dispersão longitudinal são curvas de concentração versus tempo (curvas de passagem) medidos em seções a jusante da injeção. Conforme visto no Capítulo II, da análise dessas curvas são determinados os valores do coeficiente de dispersão longitudinal e da velocidade média de trânsito.

Antes de se ir ao campo para realizar o ensaio existe uma etapa prévia em que é feito todo o planejamento, preparação e pré-dimensionamento necessários e que é quase tão importante quanto o próprio ensaio. Primeiramente é feito um reconhecimento do trecho do rio a ser estudado, utilizando-se os mapas disponíveis, e uma definição preliminar das seções que poderão ser utilizadas como locais de injeção ou como locais de monitoramento. Faz-se então um levantamento dos dados existentes sobre o rio, tais como medições de velocidade e distância entre as seções de monitoramento definidas. De posse desses dados, simula-se numericamente o ensaio utilizando-se por exemplo uma solução analítica da equação de dispersão uni-dimensional,

arbitrando-se valores para o coeficiente de dispersão longitudinal e para a velocidade média de trânsito nos vários trechos do rio a serem estudados. Esta simulação visa a fornecer dados que permitam avaliar quanto traçador deve ser injetado e quanto tempo cada equipe de monitoramento deve permanecer em cada uma das seções. O conhecimento desse tempo é indispensável para que se possa dimensionar o número de equipes e a movimentação das equipes e dos equipamentos entre as seções.

Uma vez completado o pré-dimensionamento deve-se realizar uma inspeção no campo onde são definidos detalhes de logística, como locais para pernoite e alimentação, localização exata das seções de monitoramento definidas, facilidade de acesso, etc. Após essa inspeção são feitos os ajustes necessários no planejamento, preparam-se os mapas definitivos de movimentação de equipes e equipamentos e pode-se finalmente realizar o ensaio.

A injeção da solução de traçador é feita na primeira seção do trecho em estudo de forma instantânea (batelada), simplesmente vertendo-se a solução no rio. Esta solução é preparada diluindo-se o traçador em pó em água do próprio rio. Por ser um material muito solúvel, pode-se normalmente trabalhar com concentrações de até 15%.

Após a injeção, as equipes que estão nas seções de monitoramento de jusante fazem medidas da fluorescência de amostras da água do rio (utilizando um fluorímetro) a fim de detectar o início da passagem da nuvem de traçador. A partir daí, são coletadas amostras de água em intervalos de tempo regulares (anotando-se o horário de cada coleta) conforme definido no pré-dimensionamento. As medidas de fluorescência da água do rio indicarão o fim da passagem da nuvem de traçador, quando terminam-se as coletas. Para que a curva de passagem fique bem definida, normalmente são coletadas mais de 30 amostras em cada seção de monitoramento. As amostras são acondicionadas em recipientes de polietileno escuro para se evitar a fotodecomposição e preservadas com a adição de um bactericida para prevenir-se a biodegradação.

III-3) Medidas de fluorescência

Cada traçador fluorescente possui como característica própria um certo comprimento de onda de excitação (λ_e) e um certo comprimento de onda de fluorescência (λ_f), de modo que quando incidimos sobre um traçador um comprimento de onda λ_e , este fluoresce com intensidade máxima no comprimento de onda λ_f . Assim, operar eficientemente um instrumento de medida de fluorescência é procurar excitar a amostra contendo traçador o mais próximo possível de λ_e e fazer a leitura de fluorescência o mais próximo possível de λ_f .

Os equipamentos normalmente utilizados para se medir fluorescência em estudos hidrológicos são o fluorímetro (aparelho que tem uma construção robusta própria para uso em campo) e o espectrofluorímetro (aparelho mais eficiente e para uso em laboratório). Será descrita aqui a utilização destes aparelhos tal como foi feita nos ensaios realizados pelo Laboratório de Traçadores.

1 - Medidas de fluorescência no campo

No campo normalmente é utilizado um fluorímetro, que por possuir uma construção robusta é o equipamento indicado para este fim. Este aparelho possui uma boa eficiência de detecção de fluorescência, podendo inclusive ser utilizado nas medidas de fluorescência no laboratório. O fluorímetro é utilizado no campo para determinar o horário de chegada da nuvem de traçador na seção (quando começa a coleta de amostras) e o horário em que a nuvem acaba de passar na seção (quando termina a coleta).

Este equipamento é constituído basicamente por uma lâmpada que incide luz (em um amplo espectro de comprimentos de onda) sobre um filtro de luz chamado filtro primário, que permite a passagem de uma faixa estreita de comprimentos de onda. Essa luz "selecionada" incide sobre a amostra contendo traçador, que fluoresce emitindo luz numa outra faixa de

comprimentos de onda característica para cada traçador. Essa luz de fluorescência incide sobre um filtro secundário, que "seleciona" uma pequena faixa de comprimentos de onda que finalmente incide sobre uma válvula fotomultiplicadora. Essa válvula gera um sinal elétrico proporcional à intensidade da luz incidente, que por sua vez é proporcional à quantidade de substância fluorescente na amostra. Este sinal é então medido e apresentado em um mostrador analógico ou digital, onde aparece como um valor de unidades de fluorescência em uma certa escala de amplificação.

A otimização de operação de um fluorímetro passa pela seleção adequada da lâmpada, do filtro primário e do filtro secundário, que são função do traçador que se quer medir, uma vez que os comprimentos de onda de excitação e de fluorescência são característicos do traçador (WILSON JR, COBB e KILPATRICK (1986)).

O valor de unidades de fluorescência que aparece no mostrador do fluorímetro corresponde à fluorescência total da amostra, isto é, a soma da fluorescência do traçador mais a fluorescência natural da água do rio (normalmente designada como "background"). Esta fluorescência natural em geral é proveniente de substâncias existentes na amostra tais como moléculas orgânicas, minerais em suspensão, algas ou bactérias que fluorescem na mesma faixa de comprimentos de onda que o traçador. Para separar estes dois valores de fluorescência (uma vez que se está interessado apenas na fluorescência do traçador), deve-se medir a fluorescência da água do rio sem traçador (coletada antes que o traçador chegue à seção) e subtrair este valor da fluorescência total da amostra com traçador, obtendo-se assim o valor da fluorescência líquida do traçador.

A partir dos valores de fluorescência líquida são determinados os valores das concentrações de traçador nas amostras, e para tanto são construídas retas de calibração. Estas são obtidas de uma massa de traçador medida com precisão (geralmente 1 g), a partir da qual são preparadas concentrações padrão, através de diluições sucessivas, até a faixa de concentrações esperada para as amostras coletadas no

campo. Como os equipamentos de medida de fluorescência são bastante eficientes, pode-se trabalhar em faixas de concentrações muito baixas, e portanto as diluições devem ser feitas com muito cuidado. As concentrações padrões das retas de calibração levantadas nos ensaios utilizados neste trabalho são de: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0 e 10,0 $\mu\text{g/l}$ (como o diluente é a água, tem-se que 1 $\mu\text{g/l}$ é aproximadamente igual a 1 ppb).

Quando o fluorímetro for usado no campo as diluições da reta de calibração podem ser preparadas com água destilada, pois as medidas não requerem muita precisão, destinando-se apenas a determinar o começo e o fim da coleta de amostras. Quando for utilizado no laboratório para determinar a fluorescência de todas as amostras coletadas, as diluições devem ser feitas com água coletada no local de injeção do traçador. Assim o "background" das concentrações da reta de calibração será muito próximo ou igual ao das amostras, assegurando que as concentrações da reta de calibração reproduzem o mais fielmente possível as amostras de campo. É recomendado que em cada ensaio de campo sejam feitas novas diluições e determinada uma nova reta de calibração, pois vários fatores que influem no valor da fluorescência dos traçadores podem modificar-se a cada novo ensaio, tais como eficiência eletrônica do aparelho de medida, procedência dos traçadores, "background" da água do rio, etc.

Da leitura da série de diluições no fluorímetro são obtidos os valores das fluorescências líquidas de cada uma das diluições, que relacionados com as respectivas concentrações num gráfico leitura versus concentração constituem as retas de calibração. A concentração de um traçador numa amostra fica determinada multiplicando-se a fluorescência líquida dessa amostra pelo coeficiente angular da reta de calibração.

2 - Medidas de fluorescência em laboratório

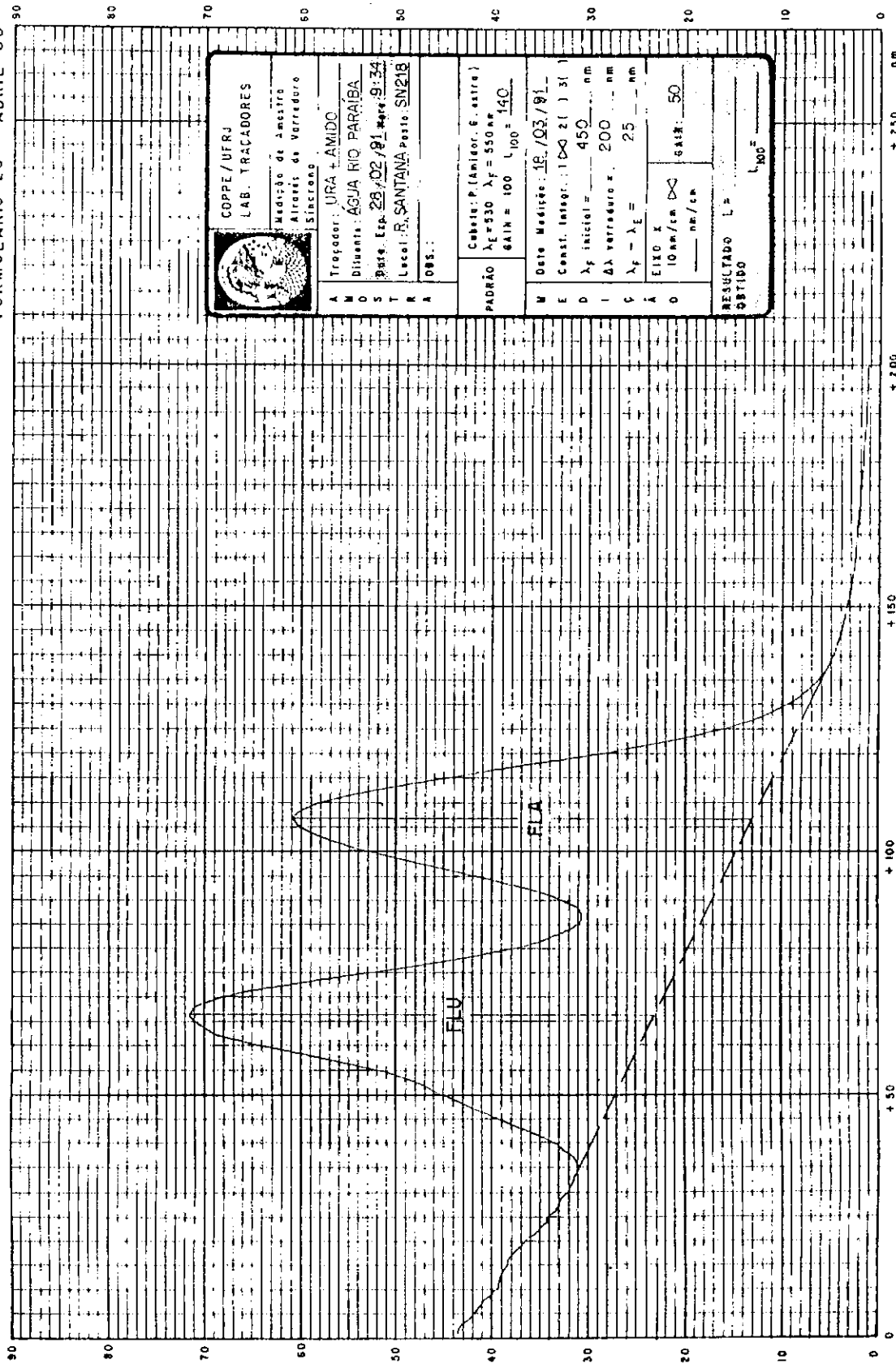
As medidas para determinação da intensidade de

fluorescência das amostras coletadas no campo são normalmente realizadas em laboratório utilizando-se um espectrofluorímetro, que consegue detectar intensidades de fluorescência bem mais baixas do que o fluorímetro.

Este aparelho possui dispositivos chamados monocromadores de excitação e de fluorescência que têm uma função similar à dos filtros primário e secundário no fluorímetro, ou seja, selecionar os comprimentos de onda oriundos da luz de excitação (lâmpada) que incidem sobre a amostra e os que, emitidos pela amostra que fluoresce, chegam à válvula fotomultiplicadora. A diferença é que com os monocromadores é possível utilizar técnicas mais sofisticadas, tal como a varredura síncrona dos espectros de excitação e de fluorescência do traçador (BENISCHKE, (1989)). Este tipo de análise produz um gráfico que relaciona comprimentos de onda com fluorescência correspondente, como mostrado na Figura III.1.

Nesta figura é apresentado o gráfico resultante da varredura síncrona de uma amostra contendo Uranina (fluorescência máxima em 515 nm) e Amidorodamina G (fluorescência máxima em 555 nm), mostrando os valores de fluorescência desses dois traçadores (eixo y) no intervalo entre 450 e 650 nm (eixo x). Este gráfico é resultante da amostra ter sido excitada no intervalo entre 425 nm e 625 nm. A escolha dos intervalos de excitação e fluorescência empregados numa varredura é feita como na escolha dos filtros primário e secundário no fluorímetro, pois a seleção correta proporciona a otimização do resultado (fluorescência mais alta) para determinado traçador ou mistura de traçadores.

Os valores de "FLU" e "FLA" mostrados na Figura III.1 são respectivamente os valores de fluorescência líquida da Uranina e da Amidorodamina G, que são obtidas subtraindo-se da fluorescência máxima total do traçador o valor abaixo da linha de base de cada pico mostrado na figura. Esta fluorescência existente abaixo da linha de base corresponde à fluorescência do "background" da amostra.




 COPPE/UFRJ LAB. TRAÇADORES	
Medição de Anisotropia Alinhamento da Varredura Síncrona	
Traçador: URA + AMIDO Dissolvente: ÁGUA RIO PARAIBA Data: 28/02/81 Hora: 9:34 Local: R. SANTANA posto SN218 OBS.:	
Cabeça: P. (Amplior. e. estre.) $\lambda_e = 530$ $\lambda_f = 550$ nm GAIN = 100 $L_{100} = 140$	
PADRÃO	
Data Medição: 18/03/81 E Const. Integr.: 100 2 () 31 D λ_f inicial = 450 nm I $\Delta\lambda$ varredura = 200 nm C $\lambda_f - \lambda_e =$ 25 nm A EIXO X ∞ D 10 nm/cm ∞ GAIN: 50 nm/cm	
RESULTADO $L =$ $L_{100} =$	

Figura III.1 : Exemplo de varredura síncrona de uma amostra contendo Uranina e Amidorodamina G efetuada num espectrofluorímetro Jobin Yvon JY3.

Observando-se a Figura III.1, nota-se uma vantagem adicional em se utilizar o espectrofluorímetro quando são realizadas medidas em amostras que contêm mais de um traçador, pois da análise do gráfico retiram-se os valores de fluorescência líquida para os dois traçadores. Num fluorímetro seria necessário realizar duas medidas em cada amostra, cada qual com o conjunto de lâmpada e filtros adequado para cada traçador e ainda a medida da amostra contendo apenas água do rio para determinar o valor do "background".

Nos ensaios executados pelo Laboratório de Traçadores, as fluorescências líquidas das amostras de campo e das diluições padrão da reta de calibração foram obtidas em laboratório com o espectrofluorímetro. A construção das retas de calibração foi feita de maneira idêntica à descrita para o fluorímetro, fazendo-se as diluições padrão utilizando água coletada no local de injeção do traçador.

A Figura III.2 mostra dois exemplos de reta de calibração, um de Uranina e outro de Amidorodamina G, utilizadas em um dos ensaios realizados no rio Paraíba do Sul. As equações das retas apresentadas foram obtidas pelo Método de Mínimos Quadrados, e para isso os valores de fluorescências estão transformados para a escala de amplificação 100, que foi escolhida como escala padrão.

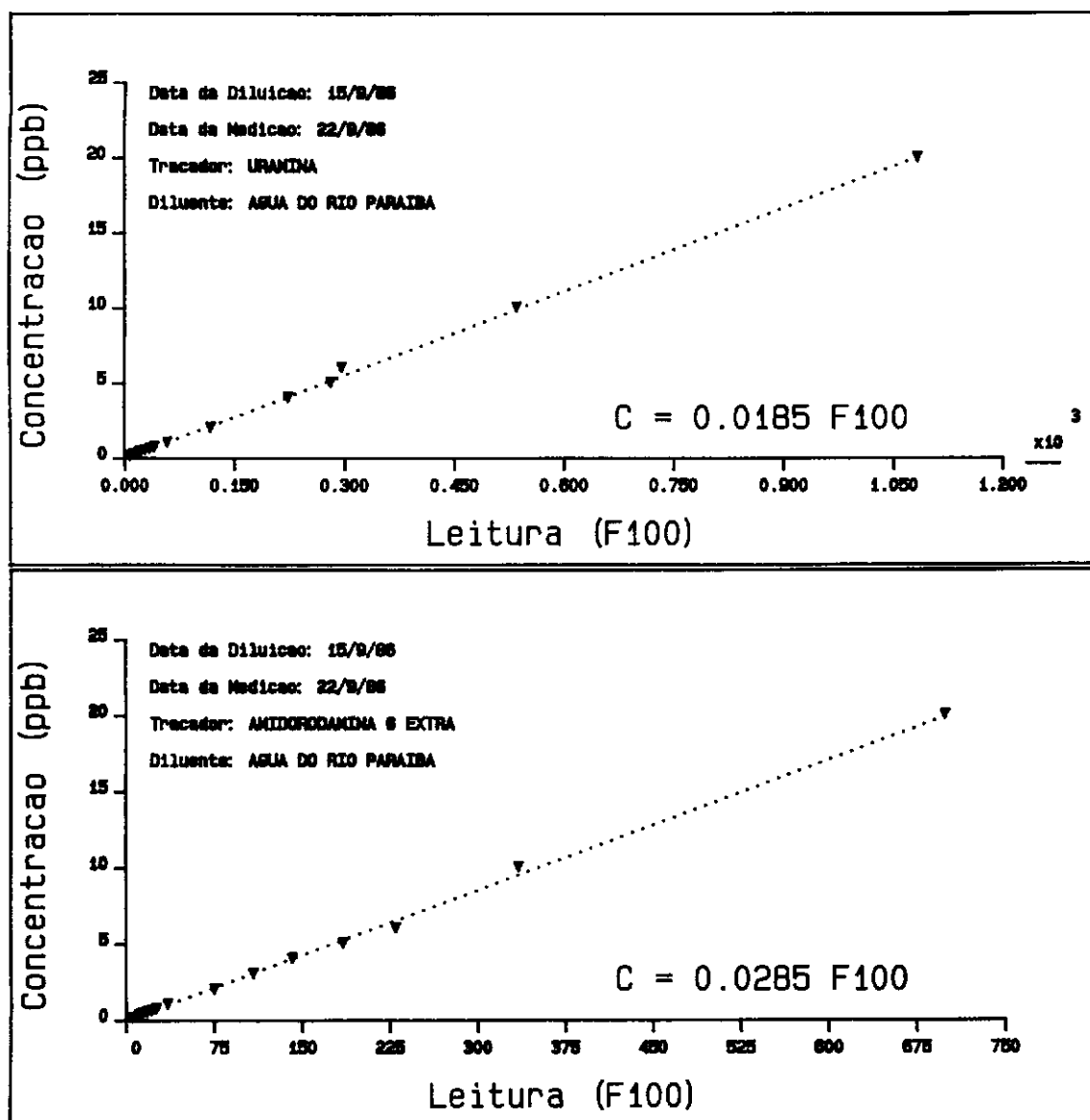


Figura III.2 : Retas de calibração de Uranina e Amidorodamina G obtidas por ajuste pelo Método de Mínimos Quadrados.

III-4) Ensaio realizados

A Figura III.3 mostra a localização das seções de injeção e monitoramento dos ensaios de dispersão longitudinal realizados na bacia do rio Paraíba do Sul pela equipe do

Laboratório de Traçadores da COPPE/UFRJ. Os ensaios foram realizados em um trecho do rio Paraíba do Sul, nos reservatórios de Santana, Vigário e Ponte Coberta, no Ribeirão das Lajes e no rio Guandu, todos localizados no estado do Rio de Janeiro. Os ensaios no trecho Volta Redonda - Santa Cecília do rio Paraíba do Sul (ROLDÃO (1988)) foram contratados pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) e os do trecho Santa Cecília - Guandu (ROLDÃO (1991)) pela Companhia Estadual de Águas e Esgoto (CEDAE).

Na maioria destes ensaios foi feita uma injeção simultânea de dois traçadores, pois se desejava obter dados para comparar seu desempenho. Em ensaios envolvendo mais de um traçador, o fluorímetro utilizado no campo é preparado com lâmpada e filtros para detectar apenas um dos traçadores. Nos ensaios realizados ele foi preparado para detectar a Uranina, que dos traçadores utilizados é o mais eficiente em termos de fluorescência, ou seja, para uma dada concentração, o valor de fluorescência da Uranina é maior do que o dos outros traçadores. Quando as amostras de campo contêm dois traçadores, as diluições padrão das retas de calibração são feitas também com dois traçadores colocando-se 1 g de cada traçador no primeiro balão volumétrico da série de diluições. A varredura de uma amostra contendo dois traçadores produz um gráfico como o mostrado na Figura III.1.

Neste capítulo serão apresentadas as curvas de passagem apenas da Uranina, que foi o traçador utilizado em todos os ensaios, sendo que as curvas de passagem mostradas para os trechos com várias seções de monitoramento são apenas uma visão global do ensaio. As curvas de passagem dos outros traçadores e os detalhes referentes ao planejamento e execução de cada um dos ensaios podem ser obtidos diretamente das referências citadas.

Para efeito de apresentação neste trabalho, os ensaios foram divididos em três grupos segundo as características do escoamento nos diversos trechos estudados, a saber:

- canal e tubulação
- rio
- reservatório

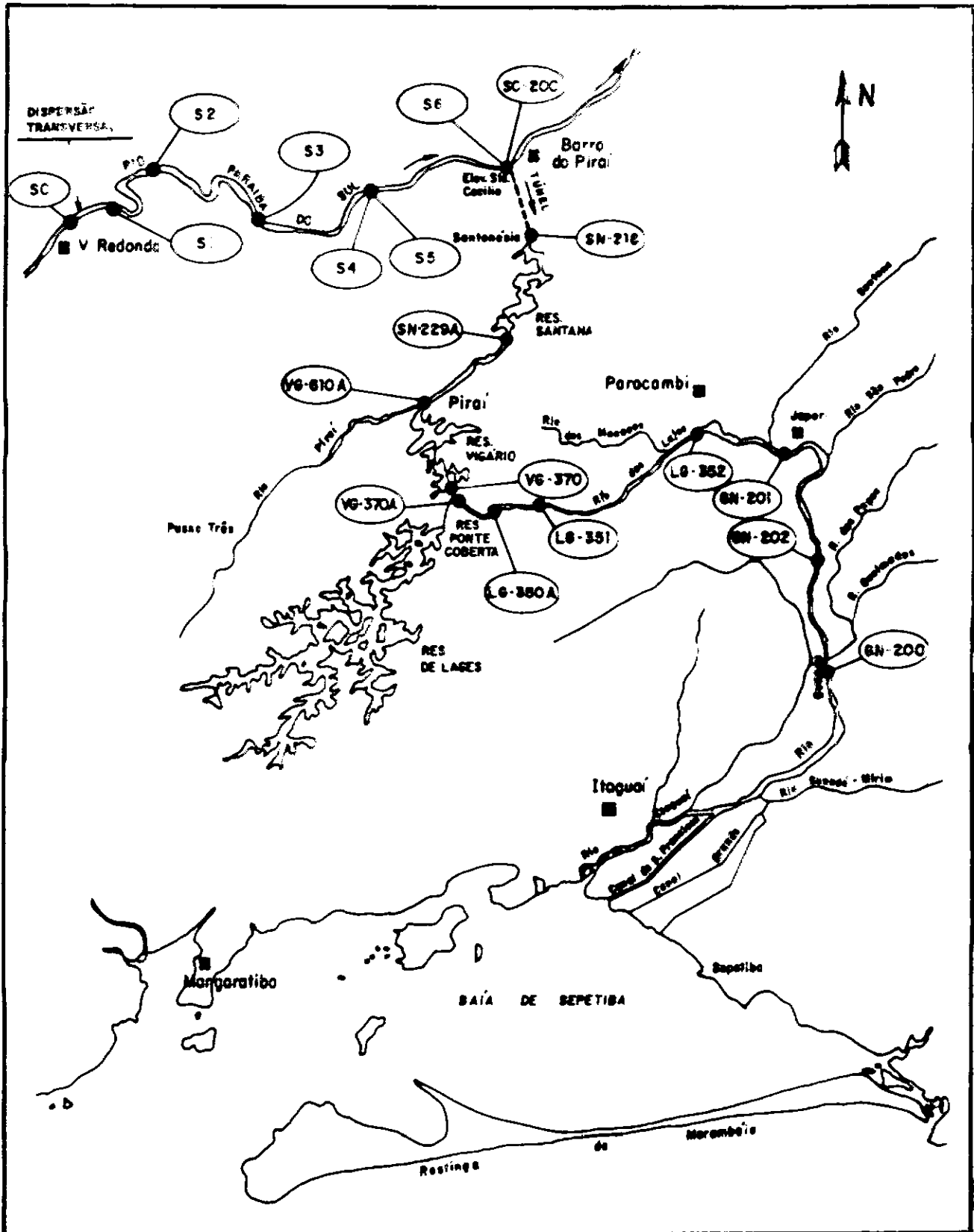


Figura III.3 : Localização das seções de monitoramento dos ensaios realizados na bacia do rio Paraíba do Sul.

1 - Ensaio em canal e tubulação

O trecho em canal está situado imediatamente a montante do Reservatório de Santana entre as seções SC200 e SN218 (Figura III.3). É constituído na parte inicial por um túnel de 3300 m escavado na rocha (onde o escoamento se dá a superfície livre) que recebe a água bombeada do rio Paraíba do Sul pela Elevatória de Santa Cecília e na parte final por um canal revestido de concreto com 2500 m de comprimento. A injeção dos traçadores foi feita num poço de visita do recalque da Elevatória de Santa Cecília. Após passarem pelas bombas, percorreram o túnel e o canal (que são estreitos) em regime bastante turbulento, com velocidades da ordem de 2 m/s. Assim, pode-se afirmar que ao alcançar a seção de monitoramento (SN218) os traçadores já estavam bem misturados ao longo de toda a seção do canal.

Devido às grandes velocidades, o tempo de passagem da nuvem de traçador na seção SN218 é da ordem de minutos. Para se obter uma boa definição da curva de passagem, o tempo entre duas coletas foi de apenas 15 segundos. As principais características deste ensaio estão apresentadas no quadro abaixo:

Quadro III.1 : Dados básicos do ensaio de dispersão longitudinal realizado em canal.

Local, Hora e Data da Injeção	Localização	Vazão m^3/s	Traçadores	Massa (Kg)
SC200; 9:00h 28/02/91	Reservatório de Santana	160	URANINA AMIDORODAMINA G	3,0 1,0

A Figura III.4 apresenta a curva de passagem obtida no fim do canal de Santa Cecília (SN218).

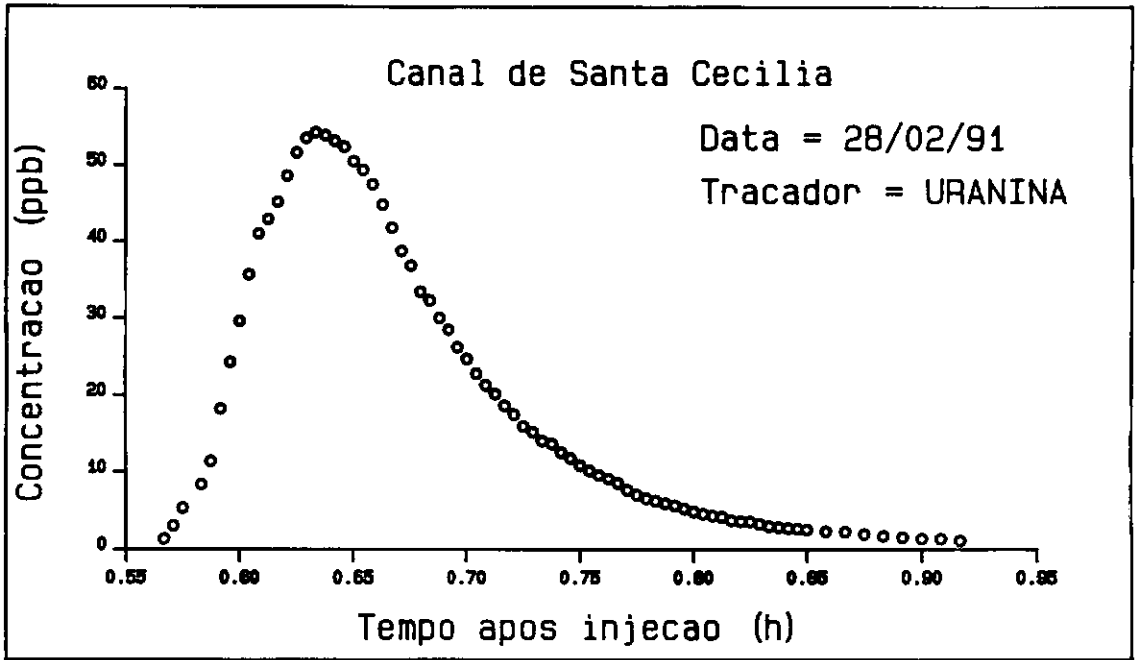


Figura III.4 : Curva de passagem de Uranina na seção SN218.

O trecho de tubulação está situado imediatamente a montante do Reservatório de Ponte Coberta entre as seções VG370 e VG370A. É composto pelos 200 m finais do canal conhecido como canal de Vigário e pela tubulação de adução da Usina Hidrelétrica de Nilo Peçanha (que trabalha sob pressão e tem um comprimento total de 1150 m). Pela pequena extensão do trecho em canal, o trecho total foi considerado como tubulação. Neste ensaio, a Uranina foi injetada no canal de Vigário e logo alcançou a tubulação de adução (onde a velocidade é em torno de 1,5 m/s), passando depois pelas turbinas da Usina de Nilo Peçanha. Como a tubulação é longa e estreita e levando-se em conta o misturamento produzido pelas turbinas, acredita-se que o traçador estava bem misturado ao chegar na seção VG370A.

Devido ao curto tempo de passagem da nuvem de traçador, o intervalo entre coletas foi de 15 segundos. No Quadro III.2 tem-se as características deste ensaio.

Quadro III.2 : Dados básicos do ensaio de dispersão longitudinal realizado em tubulação.

Local, Hora e Data da Injeção	Localização	Vazão m^3/s	Traçadores	Massa (Kg)
VG370; 9:10h 26/02/91	Reserv. de Ponte Coberta	175	URANINA	14,8

A Figura III.5 apresenta a curva de passagem obtida na seção situada imediatamente a jusante da descarga das turbinas da Usina de Nilo Peçanha (VG370A).

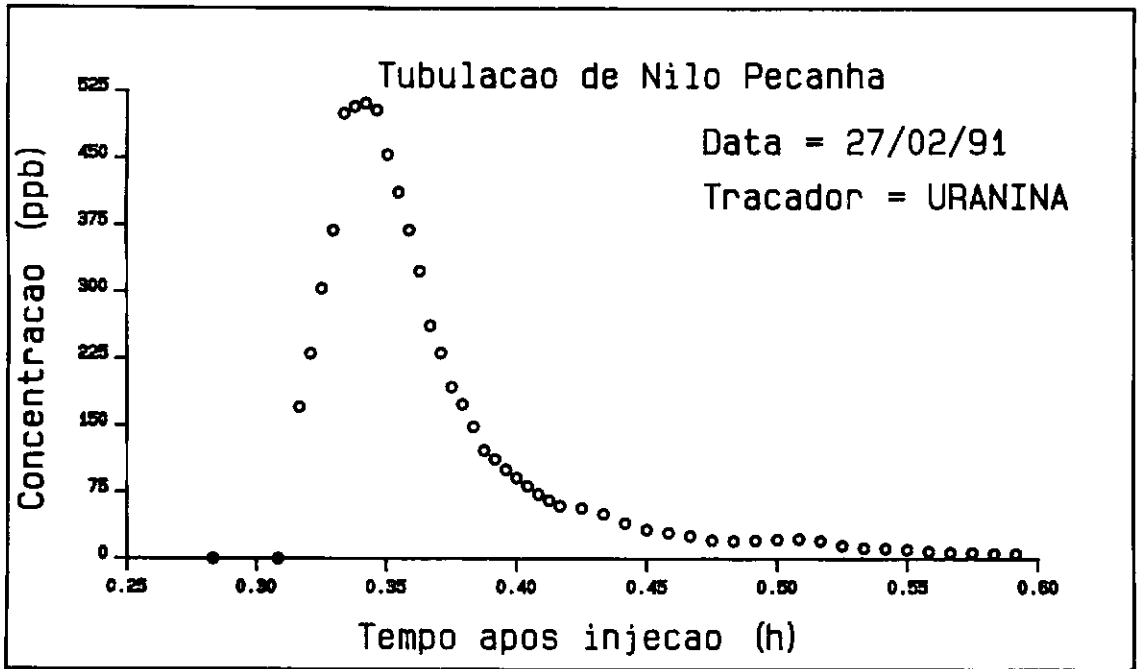


Figura III.5 : Curva de passagem de Uranina na seção VG370A.

2 - Ensaio em rio

Foram realizados ensaios em dois diferentes trechos de rios, o primeiro no rio Paraíba do Sul entre as seções S0 e S6 e o segundo no Ribeirão das Lajes e rio Guandu entre as seções LG350A e GN200.

No trecho situado entre a cidade de Volta Redonda e a Elevatória de Santa Cecília (perfazendo 40 Km ao longo do rio Paraíba do Sul) foram realizados 4 ensaios em diferentes condições de vazão. Nestes ensaios, como se desejava marcar os efluentes da CSN, a injeção foi feita num poço de visita de uma tubulação dentro das instalações da CSN e poucos minutos depois os traçadores eram lançados na margem direita do rio, através de um emissário de efluentes (seção S0). Da injeção feita na seção S0 originaram-se as curvas de passagem monitoradas nas seções S1, S2, S3, S4, S5 e S6. O quadro abaixo apresenta os principais dados destes ensaios.

Quadro III.3 : Dados básicos dos ensaios de dispersão longitudinal realizados no rio Paraíba do Sul.

Local, Hora e Data da Injeção	Localização	Vazão m^3/s	Traçadores	Massa (Kg)
S0; 6:35 h 09/09/86	Rio Paraíba do Sul	272	URANINA AMIDORODAMINA G	10,0 10,0
S0; 6:15 h 08/01/87		342	URANINA AMIDORODAMINA G	5,0 5,0
S0; 7:00 h 29/01/87		639	URANINA AMIDORODAMINA G	5,0 5,0
S0; 7:00 h 15/12/87		294	URANINA SULFORODAMINA B	5,0 5,0

Nos ensaios realizados no rio Paraíba do Sul, nas seções S1, S2 e S4, foram monitoradas respectivamente 6, 6 e 3 curvas de passagem, medidas em diferentes verticais ao longo da seção transversal do rio, com o objetivo de avaliar o grau de misturamento dos traçadores ao longo da seção transversal. Este monitoramento permite determinar experimentalmente a partir de que ponto do rio a dispersão da nuvem de traçador pode ser considerada uni-dimensional. Na Figura III.6 são mostradas as curvas de passagem de Uranina em 3 verticais nas seções S1, S2 e S4 do ensaio realizado em 09/09/86.

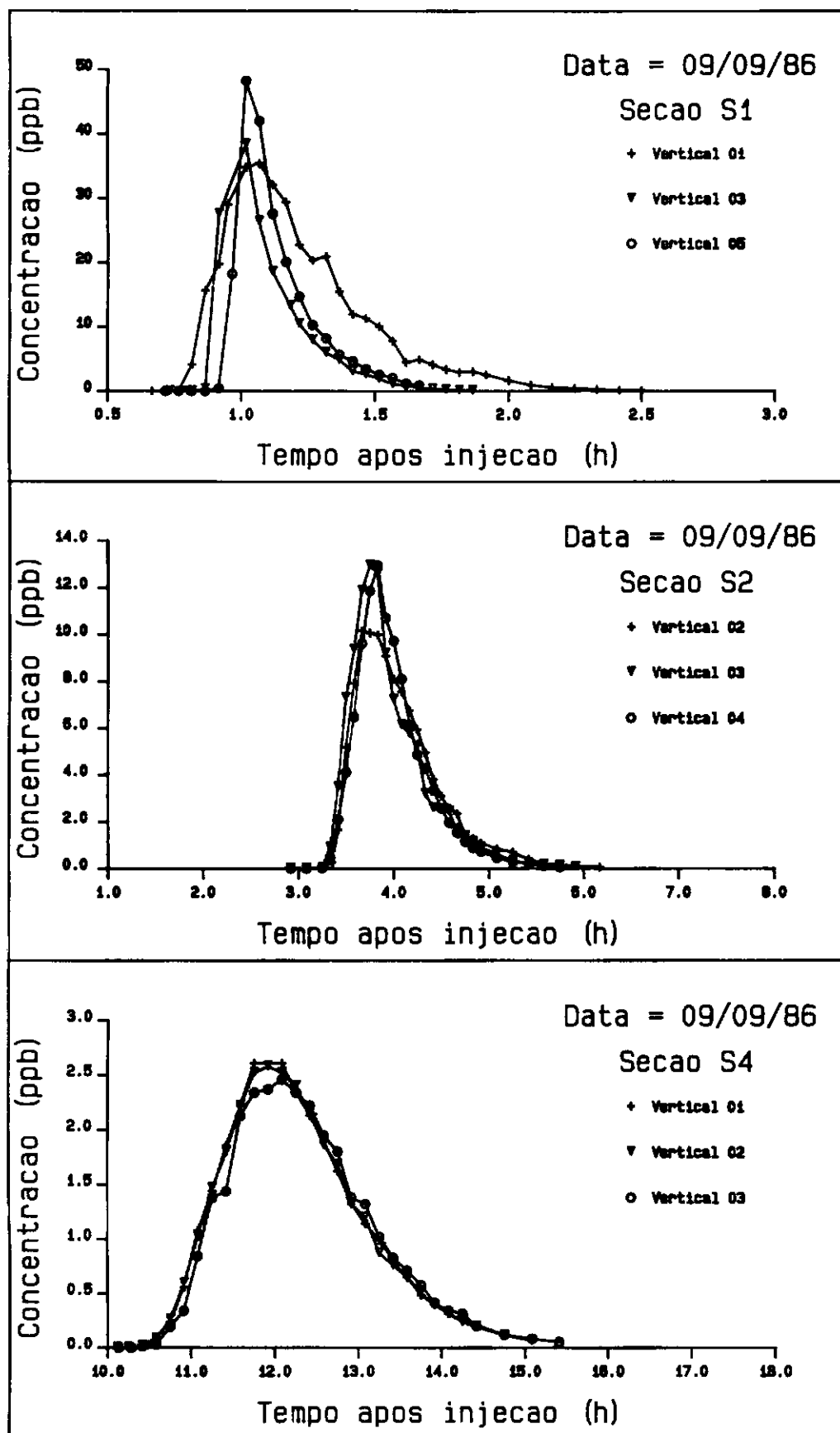


Figura III.6 : Curvas de passagem de Uranina em três verticais nas seções S1, S2 e S4 do ensaio de 09/09/86.

Como se pode notar, na seção S1 a maior parte do traçador (maiores concentrações, maior área sob a curva) está na região próxima à margem direita do rio (vertical 1), logo ainda não foi alcançada a região em que o escoamento pode ser considerado como uni-dimensional. Por esse motivo, essas curvas de passagem não podem ser utilizadas para cálculo do coeficiente de dispersão longitudinal pela teoria de dispersão descrita no Capítulo II (válida para o caso uni-dimensional). A partir da seção S2, as áreas sob as curvas de passagem nas verticais de uma mesma seção são suficientemente semelhantes para que se possa considerar que o misturamento lateral completo foi alcançado.

Nas Figuras III.7 a III.10 são apresentados gráficos mostrando uma visão geral das curvas de passagem dos ensaios realizados no rio Paraíba do Sul. Nas seções em que foram monitoradas mais de uma vertical é mostrada apenas a curva de passagem da vertical situada no centro do rio. Como as seções S4 e S5 situam-se muito próximas e os dados monitorados na seção S4 são mais completos, serão apresentados apenas as curvas desta seção. Nos ensaios de 08/01/87 e 29/01/87 a seção S3 não foi monitorada.

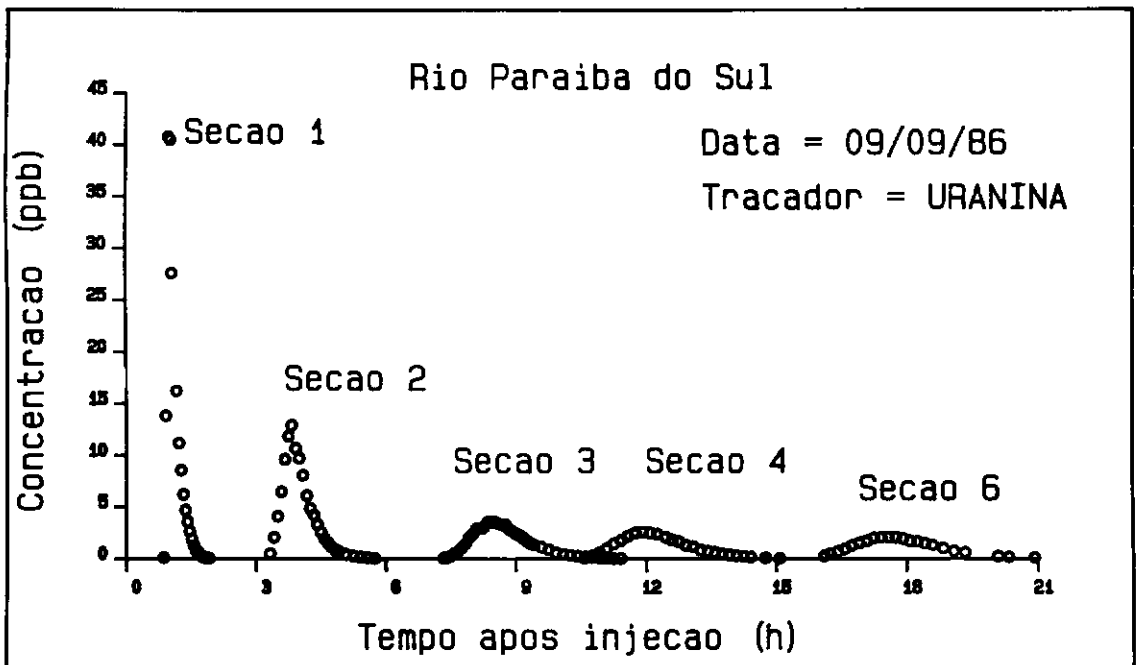


Figura III.7 : Curvas de passagem de Uranina no ensaio de 09/09/86.

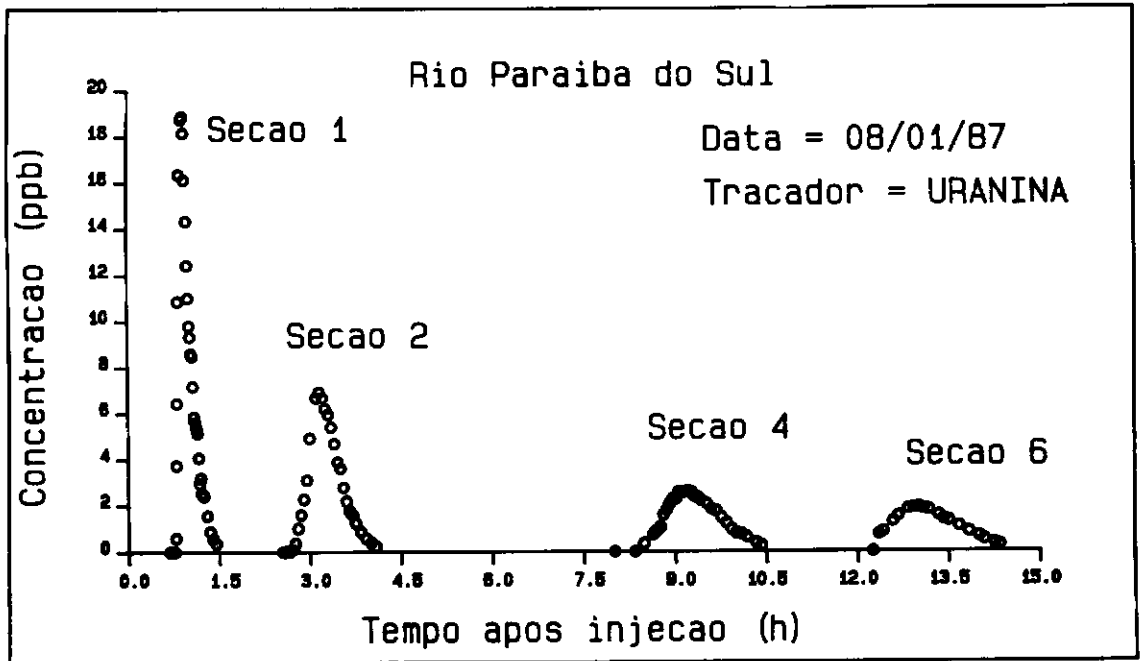


Figura III.8 : Curvas de passagem de Uranina no ensaio de 08/01/87.

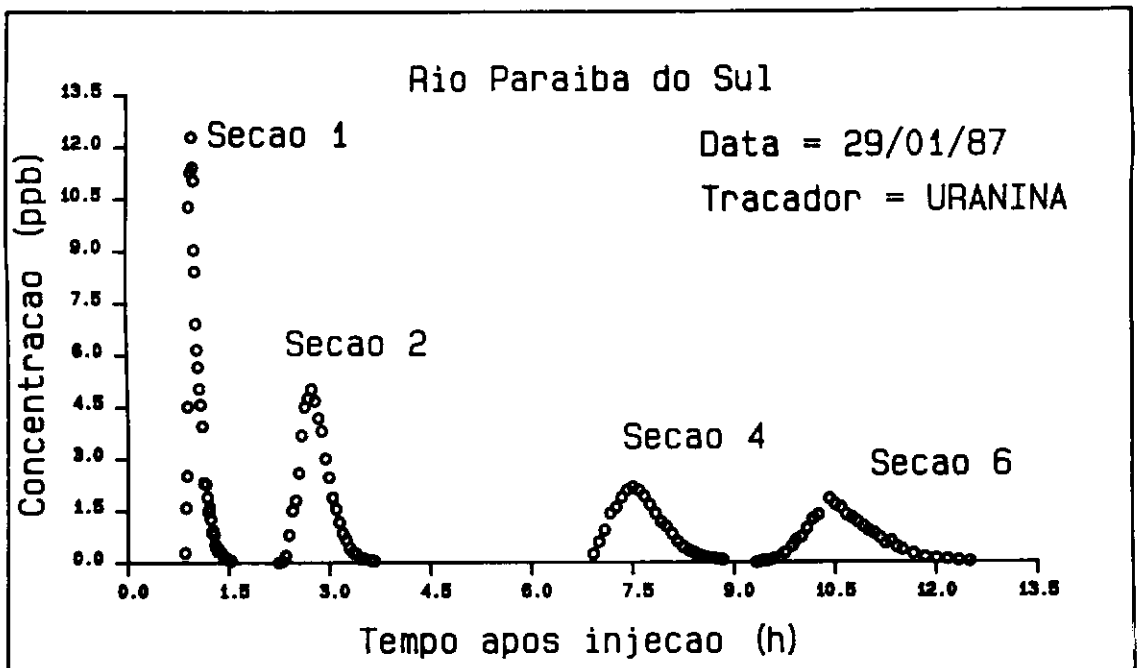


Figura III.9 : Curvas de passagem de Uranina no ensaio de 29/01/87.

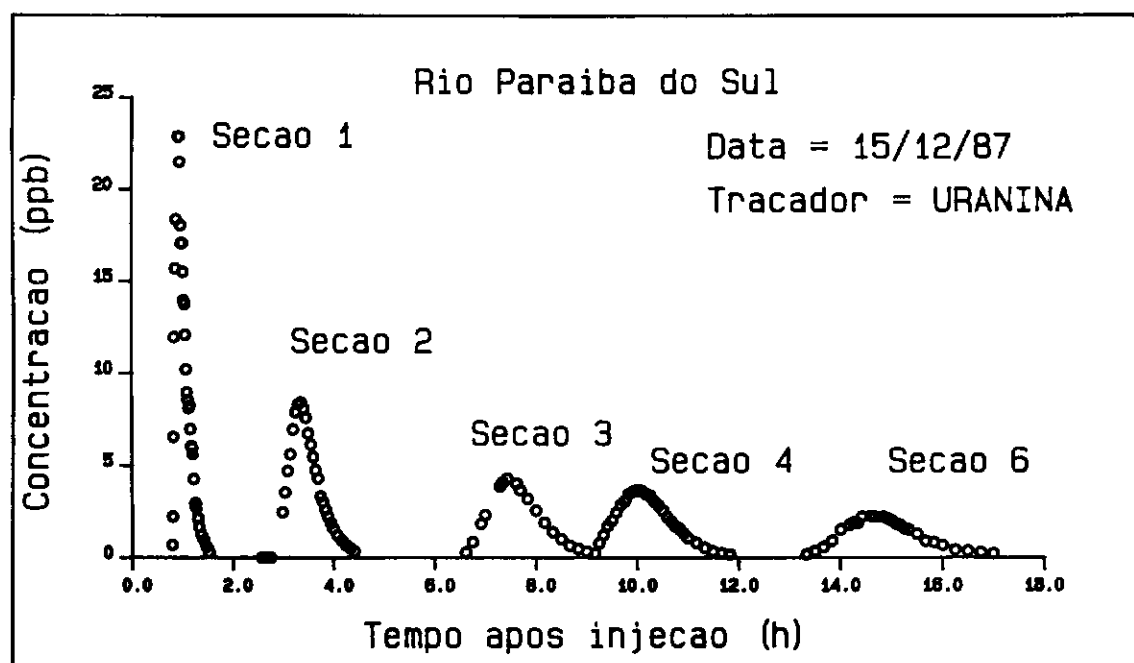


Figura III.10 : Curvas de passagem de Uranina no ensaio de 15/12/87.

A injeção do ensaio do Ribeirão das Lajes e rio Guandu foi feita na seção LG350A, que corresponde à barragem da Usina Hidrelétrica de Pereira Passos, onde os traçadores foram lançados no meio da seção do rio imediatamente a jusante da barragem. Uma vez que o trecho entre LG350A e LG351 é estreito e longo (quase 6 Km), com corredeiras e velocidade em torno de 1 m/s, acredita-se que os traçadores ao chegarem à seção LG351 já tenham alcançado o misturamento lateral completo. As curvas de passagem nas seções LG351, LG352, GN201, GN202 e GN200 são provenientes da injeção feita em LG350A. O quadro abaixo apresenta as principais características do ensaio realizados neste trecho.

Quadro III.4 : Dados básicos do ensaio de dispersão longitudinal realizado no Ribeirão das Lajes e rio Guandu.

Local, Hora e Data da Injeção	Localização	Vazão m^3/s	Traçadores	Massa (Kg)
LG350A; 8:20h 26/02/91	Rib. das Lajes e Rio Guandu	175	URANINA AMIDORODAMINA G	2,8 1,0

A Figura III.11 mostra uma visão geral das curvas de passagem do ensaio do Ribeirão das Lajes e rio Guandu.

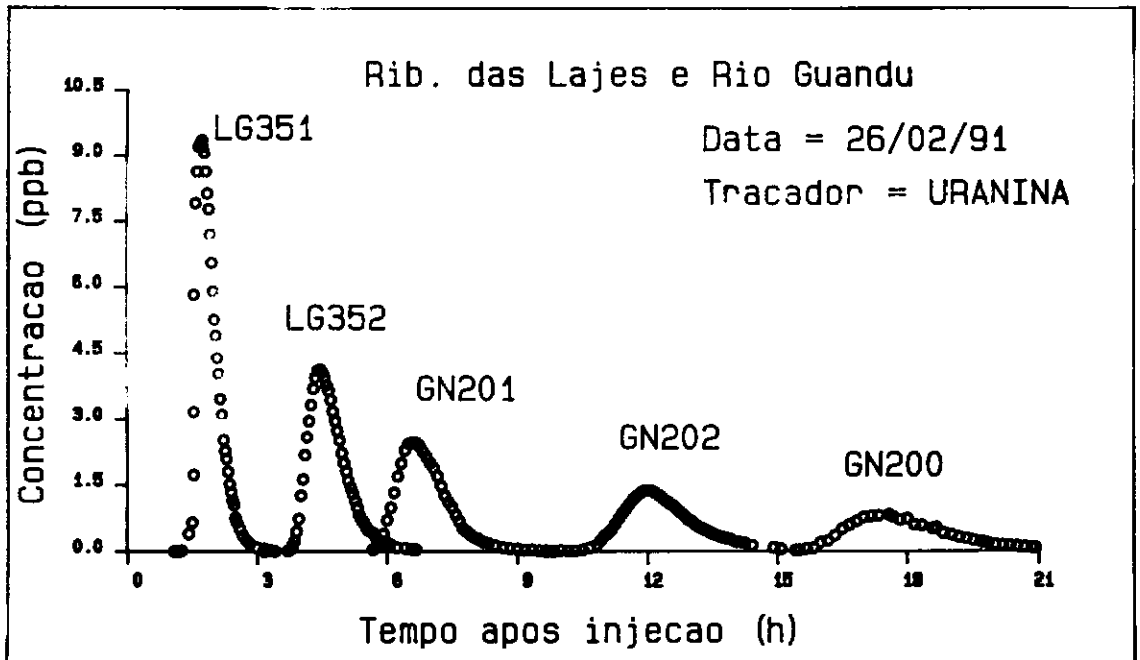


Figura III.11 : Curvas de passagem de Uranina no ensaio de 26/02/91.

3 - Ensaio em reservatório

Foram realizados ensaios em três pequenos reservatórios artificiais formados pelo aproveitamento hidrelétrico da água que é desviada da bacia do rio Paraíba do Sul para a bacia do rio Guandu. Estão situados (Figura III.3) no trecho entre a Elevatória de Santa Cecília (seção SC200) e a Usina Hidrelétrica de Pereira Passos (seção LG350A).

O modelo de dispersão uni-dimensional apresentado no Capítulo II pode fornecer uma aproximação razoável das características de misturamento de determinados reservatórios quando estes são tratados como "caixas pretas". Deste modo são obtidas apenas informações das características de misturamento e transporte do reservatório como um todo e não informações detalhadas de como esse misturamento se dá na massa líquida no interior do reservatório. Admitindo um certo

perfil de concentrações entrando no reservatório, o modelo uni-dimensional pode ser utilizado para obter uma aproximação do perfil de concentrações na saída. No Capítulo IV será visto o ajuste de curvas geradas por este modelo às curvas de passagem levantadas nos ensaios em reservatórios. O quadro abaixo mostra as principais características destes ensaios.

Quadro III.5 : Dados básicos dos ensaios de dispersão longitudinal realizados em reservatórios.

Local, Hora e Data da Injeção	Localização	Vazão m^3/s	Traçadores	Massa (Kg)
VG370; 9:10h 26/02/91	Reserv. de Ponte Coberta	175	URANINA	14,8
VG610A; 8:15h 27/02/91	Reservatório de Vigário	160	URANINA	15,0
SC200; 9:00h 28/02/91	Reservatório de Santana	160	URANINA AMIDORODAMINA G	3,0 1,0

O Reservatório de Santana (situado entre as seções SN218 e VG610A) recebe a água bombeada do rio Paraíba do Sul pela Elevatória de Santa Cecília após essa água ter passado pelo túnel e pelo canal descritos no item 1. Assim, a injeção feita em SC200, além de gerar a curva de passagem em SN218, deu origem também às curvas de passagem em SN229A e VG610A. Este reservatório é bastante retilíneo, e num levantamento de 1976 apresentava seções com larguras em torno de 100 m e profundidade em torno de 3 m. Nos últimos anos sofreu um assoreamento acentuado que reduziu bastante sua capacidade de armazenamento. Atualmente encontra-se com grande parte de sua largura tomada por vegetação flutuante e com uma seção de escoamento central bastante reduzida, com velocidades em torno de 0,5 m/s (típica de um rio). Por causa destas características particulares, acredita-se que o modelo uni-dimensional pode fornecer uma boa previsão das curvas de passagem neste reservatório. Na Figura III.12 são mostradas as curvas de passagem monitoradas no meio e no fim deste

reservatório.

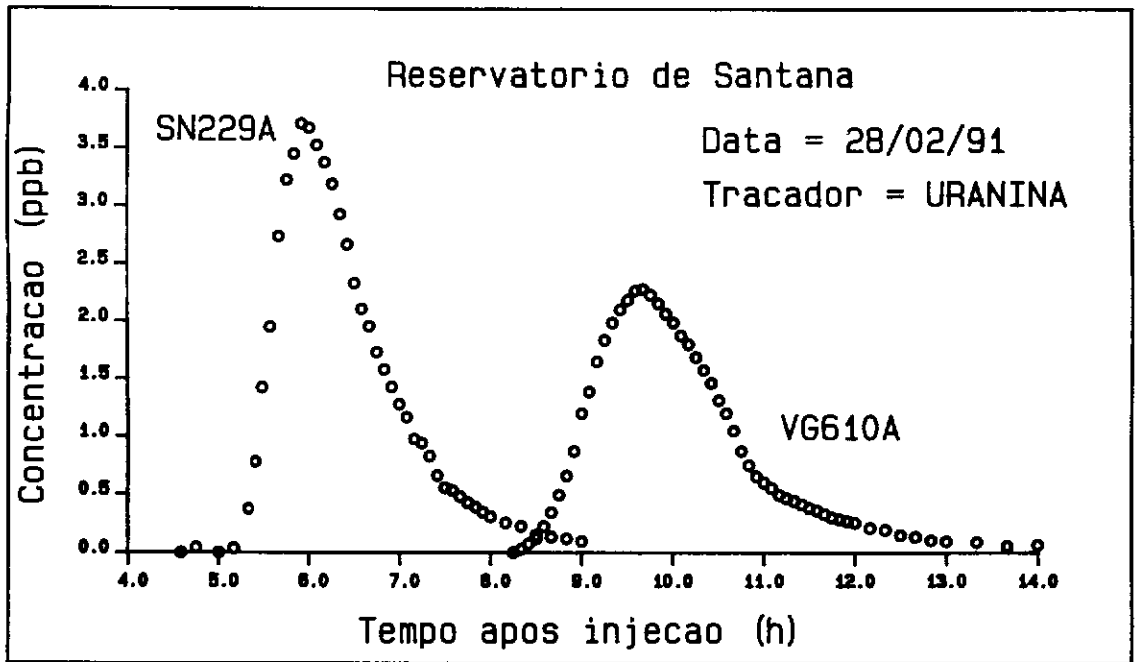


Figura III.12 : Curvas de passagem de Uranina no Reservatório de Santana.

A seção VG610A situa-se na tomada d'água da Elevatória de Vigário, que bombeia a água do Reservatório de Santana para o de Vigário. Nesta seção foi feita a injeção de traçador que, após passar pelas bombas e pelo Reservatório de Vigário, deu origem à curva de passagem na seção VG370. Este reservatório possui um canal central de escoamento cuja largura varia entre 100 e 650 m com profundidades entre 5 e 12 m, e com diversos braços nos quais a velocidade é praticamente nula. A Figura III.13 apresenta a curva de passagem na única seção de monitoramento neste reservatório (VG370), situada no seu canal de saída. Observa-se que a nuvem de traçador levou mais de um dia para passar por esta seção.

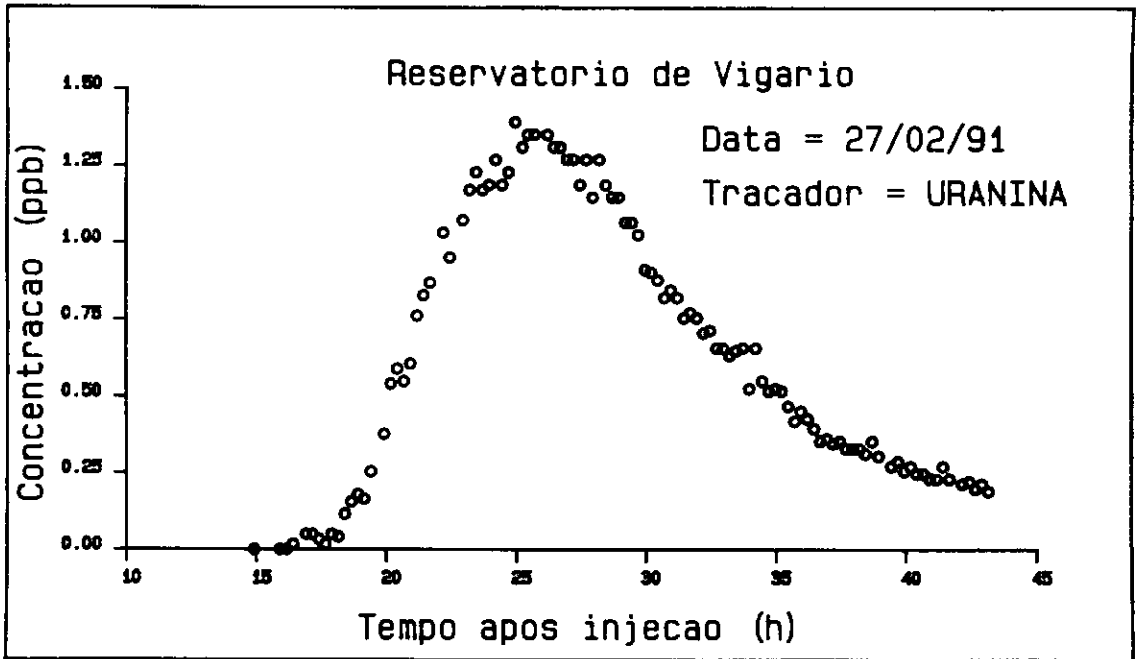


Figura III.13 : Curva de passagem de Uranina na saída do Reservatório de Vigário.

A injeção feita para marcar o Reservatório de Ponte Coberta foi a mesma descrita no ensaio de tubulação (ítem 1), ou seja, o traçador após passar pela seção VG370A entrou no reservatório e originou a curva de passagem na seção LG350A. Este reservatório é o mais profundo dos estudados (profundidades entre 13 e 21 m) e praticamente não apresenta ramificações no seu canal principal, que tem uma largura variando de 130 a 330 m. A Figura III.14 apresenta a curva de passagem na seção LG350A, situada na saída do reservatório (Usina de Pereira Passos). Nota-se que o tempo total de passagem da curva nesta seção é de aproximadamente dois dias.

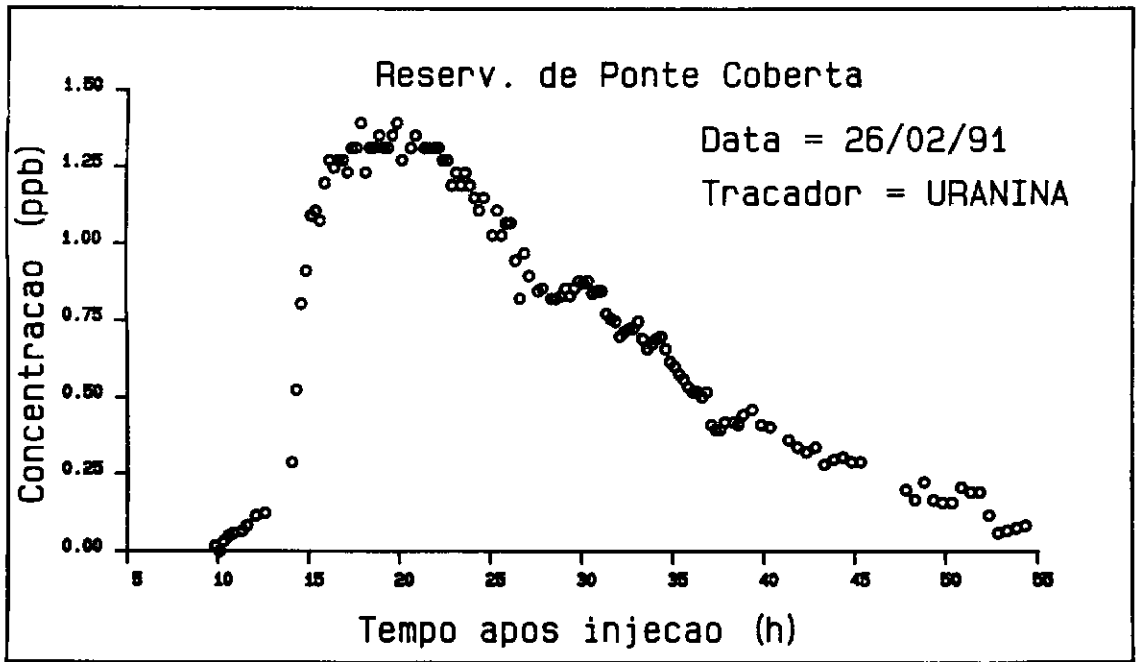


Figura III.14 : Curva de passagem de Uranina na saída do Reservatório de Ponte Coberta.

IV - DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DISPERSÃO LONGITUDINAL

Neste capítulo será feita a determinação de D_L para os vários trechos onde foram realizados os ensaios com traçadores fluorescentes descritos no Capítulo III. Para isso serão aplicadas as diversas metodologias de cálculo de D_L apresentadas no Capítulo II. As fórmulas empíricas e métodos analíticos serão aplicadas apenas ao rio Paraíba do Sul, pois não existem medições dos dados utilizados por estas formulações no trecho entre a seção SC200 e a seção GN200 (Figura III.3).

IV-1) Fórmulas empíricas

Os dados necessários à utilização das fórmulas apresentadas no item II-1.2 foram obtidos de medições de vazão realizadas pela Light Serviços de Eletricidade S. A. nos postos hidrométricos de Volta Redonda e de Pinheiral, que são operados por esta companhia. Foram escolhidos dados de medições (mostradas no Apêndice I) cujas vazões eram próximas às dos dias de realização dos ensaios com traçadores.

Não foi possível obter dados de medições da declividade da linha d'água do rio, e os mapas existentes com os quais se podia tentar aproximá-la pelo valor da declividade do terreno apresentam uma escala (1:50000) que foi considerada muito grande para o estudo pretendido. Ao invés disto, determinou-se as leituras nos linígrafos instalados nos postos de Volta Redonda e Pinheiral num mesmo horário nos dias das medições de vazão. Estas leituras, somadas às cotas dos zeros das réguas de nível nestes locais, fornecem a cota do nível d'água nestes postos. Da diferença entre estas cotas e da distância entre os postos (medida ao longo do rio) foi determinada a declividade média do trecho, que se manteve

aproximadamente constante a 0,0003 para as diversas vazões verificadas.

Vale ressaltar que os valores utilizados para cálculo de DL com as fórmulas empíricas referem-se a uma única seção e não a valores médios ao longo do rio. O Quadro IV.1 apresenta os valores de DL calculados utilizando-se os dados apresentados no Apêndice I.

Quadro IV.1 : Valores de DL (m^2/s) calculados por fórmulas empíricas para as seções de Volta Redonda e Pinheiral.

	Volta Redonda			Pinheiral		
Vazão (m^3/s)	293	351	678	277	342	479
McQuivey e Keefer	474	538	1018	350	433	596
Fischer	277	362	484	760	993	982
Liu	180	198	178	362	352	308
Petersen	85	93	83	162	157	151

IV-2) Métodos analíticos

Dos métodos analíticos descritos no Capítulo II, o método de Fischer utiliza dados da geometria da seção transversal e do perfil de velocidades longitudinais na seção (Apêndice I), enquanto o método de Jain utiliza dados da seção normalizada definida no item II-1.2. O Quadro IV.2 apresenta os dados das seções transversais depois de normalizadas segundo o método de Jain (a definição dos parâmetros apresentados é feita no item II-1.2). Os valores apresentados foram calculados de modo que a área da seção

transversal permanecesse constante, como indicado por Jain.

Quadro IV.2 : Dados das seções de Volta Redonda e Pinheiral normalizadas segundo o método de Jain.

	Volta Redonda			Pinheiral		
Vazão (m^3/s)	293	351	678	277	342	479
d1 (m)	3,50	3,45	4,94	2,23	2,37	3,40
d2 (m)	3,55	3,72	5,25	2,90	2,94	3,18
W (m)	120,0	126,6	128,3	153,7	153,0	155,5
Wf (m)	103,1	110,0	98,5	134,5	135,2	133,2
n	1,29	1,45	1,96	4,2	4,8	4,4
m	3,49	3,12	3,83	3,4	2,2	2,2

O valor da declividade da linha d'água utilizado foi o mesmo calculado para as fórmulas empíricas. Para os dois métodos analíticos o valor de s_y utilizado foi calculado pela fórmula empírica apresentada no item II-2, com α igual a 0,6. O quadro abaixo apresenta os valores de D_L calculados.

Quadro IV.3 : Valores de D_L (m^2/s) calculados por métodos analíticos para as seções de Volta Redonda e Pinheiral.

	Volta Redonda			Pinheiral		
Vazão (m^3/s)	293	351	678	277	342	479
Fischer	52	42	59	238	205	78
Jain	5	7	43	55	66	13

IV-3) Métodos com uso de traçador

1 - Ajustes de curvas de passagem

Uma questão que nem sempre é lembrada quando são feitos ajustes de curvas de passagem para determinação de D_L é a do balanço de massa entre as curvas. Aplicando-se a lei de conservação de massa entre a injeção de uma massa M e uma seção situada a jusante (supondo-se que a vazão permanece constante durante a realização do ensaio) tem-se:

$$M = Q \int_{-\infty}^{\infty} C \, dt \quad (\text{IV.1})$$

onde: $\int_{-\infty}^{\infty} C \, dt$ = área sob a curva de passagem.

Na equação (IV.1), nota-se que se o escoamento é permanente (Q é constante) e não há perda de traçador (M se conserva), a área sob a curva de passagem permanece constante. O que se verifica normalmente nas curvas experimentais é que a área sob a curva diminui quando se caminha para jusante. Este efeito tanto pode ser proveniente da perda de traçador (analisada em detalhes no Capítulo VII) quanto do aumento da vazão (contribuição subterrânea ou de tributários). Uma vez que ambos os fatores provocam um abatimento da curva, da simples análise da área sob a curva não é possível determinar se houve perda de traçador ou aumento de vazão. Como as hipóteses de escoamento permanente e de conservação da massa foram feitas na dedução da equação de dispersão uni-dimensional, o ajuste de curvas de passagem só deve ser feito entre curvas que tenham a mesma área.

Assim, as concentrações geradas pelos métodos que fazem ajuste de curvas de passagem devem ser corrigidas por um fator de recuperação de massa, que é obtido dividindo-se a área sob a curva experimental de jusante pela área sob a curva experimental de montante usadas no ajuste. A Figura

IV.1 mostra um ajuste feito com correção e outro sem correção entre as curvas de passagem de Uranina na vertical 04 da seção S2 e na vertical 02 da seção S4 do ensaio de 09/09/86.

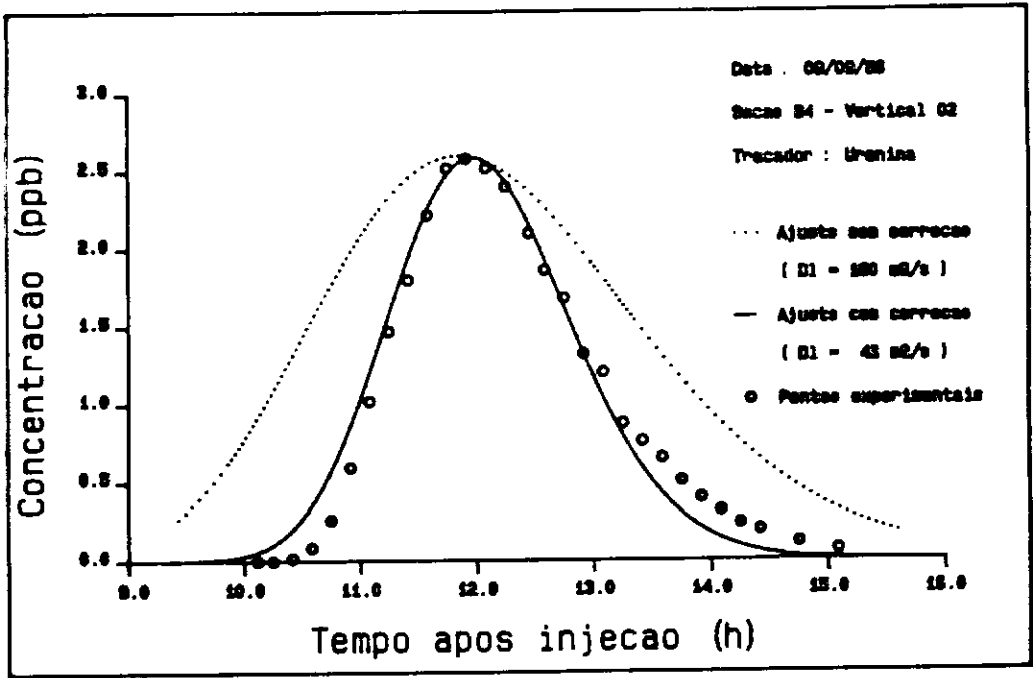


Figura IV.1 : Comparação entre ajustes com e sem correção para Uranina.

Como se observa, chega-se a resultados completamente diferentes para o coeficiente de dispersão longitudinal fazendo-se ou não a correção das áreas, e esta diferença é tanto maior quanto maior for a diferença entre as áreas sob as curvas de montante e de jusante usadas no ajuste. Isto acontece porque os métodos usados para gerar a curva de jusante implicitamente impõem a conservação da massa de traçador existente sob a curva de montante. Para tentar ajustar uma área maior (curva gerada de jusante) sobre uma área menor (curva experimental de jusante), aumenta-se o valor de Dl e chega-se a um resultado errôneo, tal como visto na Figura IV.1.

A Figura IV.2 mostra os ajustes com e sem correção utilizando-se as curvas de passagem de Amidorodamina G nos mesmos locais.

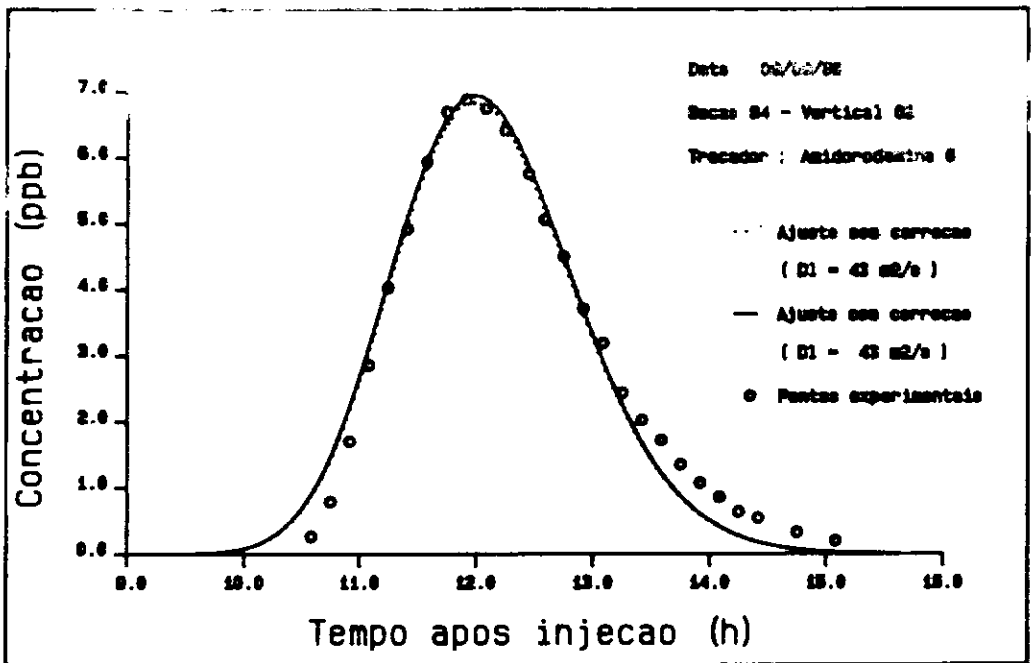


Figura IV.2 : Comparação entre ajustes com e sem correção para Amidorodamina G.

Na Figura IV.2, observa-se que as áreas sob as curvas geradas com ajuste e sem ajuste são praticamente as mesmas, o que comprova que a Amidorodamina G conservou sua massa e que não houve aumento de vazão neste trecho. Desse modo, a diferença verificada entre as curvas da Figura IV.1 deve-se à perda de massa da Uranina entre as seções de ajuste. No Capítulo VII será analisada em detalhe a comparação da perda de massa de Uranina em relação a Amidorodamina G.

O importante resultado que se tem da comparação das Figuras IV.1 e IV.2 é que, fazendo-se a correção das áreas sob as curvas, o coeficiente obtido com as curvas de Uranina é o mesmo obtido com as curvas de Amidorodamina G. Isto permite que um traçador reconhecidamente sujeito a perdas como a Uranina seja empregado em ensaios de determinação de DL com absoluta segurança de que os dados obtidos serão de boa qualidade. Uma vez que os valores de DL obtidos são os mesmos independentemente do traçador, serão utilizadas neste trabalho apenas as curvas de Uranina, que foi o traçador

empregado em todos os trechos ensaiados.

Vale ressaltar que o procedimento de correção das áreas das curvas utilizadas no ajuste não visa desprezar um possível abatimento da curva provocado por um aumento de vazão, mas separar os efeitos que devem realmente ser traduzidos pelo coeficiente de dispersão longitudinal (efeitos de misturamento do soluto na massa líquida) dos efeitos de diluição (provocados pelo aumento de vazão).

2 - Cálculo de D_L

Os métodos descritos no Capítulo II que fazem ajustes de curvas de passagem para determinação de D_L foram utilizados neste trabalho fazendo-se a correção das áreas sob as curvas. O critério utilizado para o ajuste foi de que a curva ajustada simulasse bem as maiores concentrações da curva experimental. Uma vez que todas os ajustes utilizados baseiam-se na equação de dispersão uni-dimensional (portanto têm um perfil gaussiano), em termos práticos este critério foi considerado suficientemente preciso.

Em todos os métodos de ajuste à exceção do método de Propagação de Fischer, variando-se a velocidade média de trânsito translada-se a curva gerada no eixo do tempo (com uma velocidade maior a curva chega à seção em um tempo menor e vice versa). Os ajustes apresentados neste trabalho foram feitos de modo que a curva gerada tivesse a melhor aderência possível com a região de maiores concentrações da curva experimental.

As pequenas concentrações de traçador existentes na cauda de uma curva experimental normalmente significam pouco em termos de massa, mas aumentam consideravelmente o valor da variância da curva. Numa tentativa de contornar este efeito, que pode incrementar excessivamente o valor de D_L calculado pelo método de Variação dos Momentos, as curvas utilizadas neste método foram truncadas num valor de concentração correspondente a 3% da concentração máxima da curva.

A determinação de D_L foi dividida, segundo as características dos trechos ensaiados, no trecho $S_0 - S_6$

(trecho homogêneo de rio) e no trecho SC200 - GN200 (trecho heterogêneo). A localização das seções utilizadas é vista na Figura III.1.

2.1 - Trecho entre S0 e S6

Para se evitar a repetição de condições similares na determinação de DL neste trecho do rio Paraíba do Sul, foram escolhidos para comparação dos métodos com uso de traçador os ensaios realizados no dia 09/09/86 (menor vazão) e no dia 29/01/87 (maior vazão). Levando-se em conta as considerações feitas no item II-4, somente a partir da seção S2 o escoamento pode ser considerado como uni-dimensional, assim as curvas de passagem na seção S1 não serão utilizadas na determinação de DL.

O método de ajuste que utiliza uma solução da equação de dispersão uni-dimensional (que aqui foi chamado de "Solução de Taylor") é baseado numa injeção instantânea de massa, logo pode apenas ajustar curvas a partir do local da injeção de traçador. Para se avaliar a aplicabilidade deste método na determinação de DL no rio Paraíba do Sul, este foi aplicado a trechos definidos desde o local da injeção de traçador (S0) e comparado ao método de Convolução da Solução Analítica. Quando a origem do trecho em estudo é a seção de injeção, utiliza-se como curva de passagem experimental de montante uma curva de passagem constituída por dois pontos que têm a concentração da solução de traçador injetada separados por um tempo curto de modo a simular a injeção instantânea.

A velocidade utilizada no cálculo de DL pelo método de Variação dos Momentos apresentado no Quadro IV.4 é a mesma que aparece no método de Propagação de Fischer. Esta velocidade média de trânsito é calculada a partir dos tempos de passagem dos centros de gravidade das curvas experimentais de montante e de jusante e da distância entre as seções.

O Quadro IV.4 apresenta os valores de DL e da velocidade média de trânsito calculados para o rio Paraíba do Sul, cujos ajustes encontram-se no Apêndice II. O Quadro IV.5 apresenta estes mesmos parâmetros calculados para trechos definidos

desde a seção de injeção (S0).

Quadro IV.4 : Valores de DL (m^2/s) e \bar{u} (m/s) para os ensaios de 09/09/86 e 29/01/87 no rio Paraíba do Sul.

			Variação Momentos	Convolução Sol.Analit.		Propagação de Fischer	
Data	Trecho	Distância (Km)	DL	DL	\bar{u}	DL	\bar{u}
<u>09</u> <u>09</u> <u>86</u>	S2 - S4	18,5	75	43	0,64	40	0,62
	S2 - S6	29,8	61	36	0,61	34	0,60
	S4 - S6	11,3	42	28	0,58	25	0,56
<u>29</u> <u>01</u> <u>87</u>	S2 - S4	18,5	36	40	1,09	35	1,07
	S2 - S6	29,8	55	45	1,08	42	1,06
	S4 - S6	11,3	85	50	1,08	45	1,03

Quadro IV.5 : Valores de DL (m^2/s) e \bar{u} (m/s) para trechos desde a injeção nos ensaios de 09/09/86 e 29/01/87 no rio Paraíba do Sul.

			Solução de Taylor		Convolução Sol.Analit.	
Data	Trecho	Distância (Km)	DL	\bar{u}	DL	\bar{u}
<u>09</u> <u>09</u> <u>86</u>	S0 - S2	18,5	18	0,71	18	0,71
	S0 - S4	29,8	38	0,66	38	0,65
	S0 - S6	11,3	37	0,63	36	0,62
<u>29</u> <u>01</u> <u>87</u>	S0 - S2	18,5	27	0,99	27	0,99
	S0 - S4	29,8	33	1,05	34	1,05
	S0 - S6	11,3	40	1,05	39	1,05

Conforme observado, os ajustes por estes dois métodos levam essencialmente aos mesmos valores. Como as curvas geradas por estes métodos são praticamente iguais, no Apêndice II são apresentados apenas os ajustes com a Convolução da Solução Analítica.

2.2 - Trecho entre SC200 e GN200

Nos ensaios realizados entre as seções SC200 e GN200, existem trechos com características de escoamento bastante diversas, conforme visto no ítem III-4. Neste trabalho foram escolhidos para se determinar DL os trechos com características diferentes das de rio, pois desejava-se verificar a aplicabilidade dos métodos de ajuste a tais escoamentos. Nestes ensaios não foram calculados valores de DL pela Solução de Taylor, pois como observado no Quadro IV.5, estes valores são essencialmente os mesmos calculados pela Convolução da Solução Analítica.

Os valores de velocidade apresentados no método de Variação de Momentos são os calculados a partir dos tempos de passagem dos centros de gravidade das curvas experimentais. Para o método de Propagação de Fischer foram utilizados os valores de velocidade que proporcionavam os melhores ajustes possíveis, pois os valores calculados pela definição do método não permitiam que a curva gerada tivesse a mesma altura da curva experimental. O quadro abaixo apresenta os resultados obtidos, cujas curvas ajustadas encontram-se no Apêndice II.

Quadro IV.6 : Valores de DL (m^2/s) e \bar{u} (m/s) para os ensaios de 26/02/91, 27/02/91 e 28/02/91.

T r e c h o	Distância (Km)	Variação de Momentos		Convolução Sol.Analit.		Propagação de Fischer	
		DL	\bar{u}	DL	\bar{u}	DL	\bar{u}
SC200-SN218	5,8	6	1,23	39	2,63	18	2,63
VG370-VG370A	1,8	17	1,46	7	1,59	7	1,59
LG350A-LG351	5,8	60	0,86	46	0,93	42	0,93
VG610A-VG370	7,5	141	0,07	11	0,08	11	0,08
SN218-VG610A	18,3	92	0,51	34	0,54	32	0,55
VG370A-LG350A	4,7	271	0,05	18	0,05	11	0,05

IV-4) Discussão de resultados

A determinação de D_L através do ajuste de curvas de passagem é considerada como o melhor cálculo possível do seu valor, pois essas curvas são obtidas com ensaios de traçador, que simulam perfeitamente o movimento do soluto no trecho de rio ensaiado. Assim, as fórmulas empíricas e os métodos analíticos (metodologias aproximadas) serão comparados aos métodos de ajuste.

Todas as fórmulas empíricas superdimensionaram os valores de D_L , numa faixa entre 2 e 20 vezes os valores determinados pelos ajustes, sendo que os menores valores foram obtidos pela fórmula de Petersen.

A fórmula de McQuivey e Keefer (que apresentou os maiores valores para D_L) parece pouco aplicável aos rios de planície brasileiros, que normalmente possuem pouca declividade e grandes vazões, o que levaria sempre a valores elevados de D_L .

As fórmulas de Liu e Petersen diferem basicamente apenas pelo coeficiente adimensional, pois foram deduzidas de modo semelhante a partir de uma mesma equação proposta por Fischer.

Os valores de D_L calculados para a seção de Pinheiral pelas fórmulas de Fischer, Liu e Petersen são maiores do que os calculados para a seção de Volta Redonda, mesmo com os dados referentes a maiores vazões utilizados em Volta Redonda. Isto se dá porque o valor de D_L nestas três fórmulas é proporcional ao quadrado da largura da seção, e a seção de Pinheiral é mais larga.

Os métodos analíticos apresentaram, como esperado, resultados melhores do que as fórmulas analíticas, mas ainda com uma variação muito grande, o que dificulta a escolha de um valor para D_L . A vantagem oferecida pelo método de Jain, que é a utilização somente da geometria da seção transversal, não é muito interessante para o caso de um estudo preliminar feito com dados existentes. Isto porque, para o caso brasileiro, as seções de geometria conhecida normalmente são

as utilizadas para fins hidrométricos, onde periodicamente é realizado o levantamento do perfil de velocidades, permitindo a utilização do método de Fischer. Este método deve ser empregado preferencialmente ao método de Jain, pois sua dedução apresenta menos limitações que este. Os valores de DL calculados para a seção de Pinheiral mostraram-se superiores aos da seção de Volta Redonda, o que indica que a largura da seção tem bastante influência também nestes métodos.

Como o valor de DL deve traduzir as características de todo um trecho, a utilização das metodologias de cálculo aproximado de DL deve ser feita em várias seções do trecho em estudo (para se obter um valor médio para DL) ou com valores médios das grandezas utilizadas pelos métodos ao longo do trecho. Este procedimento visa melhorar os resultados obtidos com estas metodologias, mas como observado, não garante que sejam confiáveis. As seções utilizadas em hidrometria muitas vezes são bastante particulares em relação ao trecho do rio em que estão situadas, portanto seus dados devem ser utilizados com cautela. Outra fonte de incertezas para todos os métodos de cálculo aproximado de DL é a determinação da declividade da linha d'água, pois esta dificilmente é levantada em medições hidrométricas, mesmo para um rio com a importância do Paraíba do Sul.

Apesar do truncamento efetuado nas curvas de passagem utilizadas no método de Variação dos Momentos, os valores de DL calculados mostraram-se na maioria dos casos superiores aos determinados com os ajustes. Este truncamento pode eliminar dados importantes, principalmente em curvas assimétricas, onde a cauda da curva possui muitos pontos de concentração baixa.

O método de Convolução da Solução Analítica mostrou-se o mais abrangente dos métodos de ajuste utilizados, apresentando resultados razoáveis em trechos onde os outros métodos não tiveram bom desempenho, como por exemplo nas curvas de passagem das saídas dos reservatórios. Isto se deve principalmente ao fato de que este método gera uma curva assimétrica para a seção de jusante quando utiliza uma seção experimental de montante que também é assimétrica.

O método de Propagação de Fischer gera uma curva de jusante que é praticamente simétrica, independentemente da seção de montante utilizada e cujo centro de gravidade coincide sempre com o da curva experimental, não importando o valor da velocidade. Isto faz com que os ajustes com este método sejam ruins, apesar dos valores de D_L em alguns trechos serem próximos dos calculados com o método de Convolução da Solução Analítica. Isso fica bastante evidente nos ajustes do trecho Santa Cecília - Guandu, onde os primeiros ajustes feitos com o método de Propagação de Fischer ficaram tão ruins que os mostrados no Apêndice II foram feitos utilizando-se as velocidades determinadas previamente pelo método de Convolução da Solução Analítica.

O método da Solução de Taylor apresenta uma limitação ao seu uso, pois é aplicável apenas a trechos definidos desde a injeção, não podendo determinar D_L para trechos intermediários. Nos trechos em que foi aplicado, os resultados obtidos foram os mesmos encontrados com o método de Convolução da Solução Analítica.

V - ENSAIO DE DIFUSÃO TRANSVERSAL

Esse ensaio foi realizado no rio Paraíba do Sul, em 19/02/90 (ROLDÃO, SOARES e RIGO (1991)), no trecho situado imediatamente a jusante do ponto de confluência do emissário de efluentes da Companhia Siderúrgica Nacional (Figura III.3). Além da determinação do coeficiente de difusão transversal, a injeção contínua e simultânea de dois traçadores fluorescentes permitiu obter informações sobre seu desempenho neste tipo de ensaio.

Na condição de fluxo permanente de traçador obtida com uma injeção contínua determinam-se curvas de concentração versus distância à margem em diversas seções do trecho de rio em estudo, e da análise dessas curvas determina-se o coeficiente de difusão transversal do trecho. Neste capítulo serão vistos em detalhe todos os procedimentos relativos à realização do ensaio, pois na literatura citada estes encontram-se resumidos.

V-1) Traçadores

Os traçadores fluorescentes Uranina e Sulforodamina B empregados neste ensaio são idênticos aos descritos nos ensaios de dispersão longitudinal. Estes traçadores foram também utilizados simultaneamente no ensaio do dia 15/12/87 no trecho entre S0 e S6 (item III-4).

Para obter dados que permitissem a comparação do desempenho destes traçadores neste tipo de ensaio (em que o tempo de permanência do traçador no rio é pequeno), a solução de traçador a ser injetada foi preparada diluindo-se os dois traçadores num mesmo volume de água. Esta comparação de desempenho será vista em detalhes no Capítulo VII.

V-2) Procedimentos de campo

Antes da realização do ensaio deve-se realizar o pré-dimensionamento e planejamento das atividades de campo. No pré-dimensionamento determina-se quantas seções serão monitoradas e a distância destas à injeção, a concentração da solução de traçador e sua vazão de injeção, o tempo total de injeção e o espaçamento entre coletas de amostras. No planejamento são especificados os procedimentos das equipes de injeção e coleta (que é feita normalmente com um barco) e detalhadas as atividades de cada participante com respectivos tempos de duração.

A primeira seção de monitoramento deve situar-se num ponto em que o misturamento vertical já esteja completo e a última seção num local em que o traçador ainda não tenha alcançado as margens. Para determinar esses locais recorre-se a formulações encontradas na literatura ou a dados obtidos em ensaios preliminares. O número de seções será determinado pelo grau de detalhe que se deseja do estudo e limitado por fatores como tempo total disponível para realização do ensaio e quantidade de traçador viável de ser utilizada.

O tempo total de injeção depende do número de seções que serão monitoradas, pois deve-se manter um fluxo constante de traçador enquanto são feitas as coletas de amostras. É necessário fazer uma estimativa do tempo que será gasto para monitorar cada seção, que dependerá da distância entre as seções, largura do rio, espaçamento entre coletas e da maneira com que as coletas serão feitas.

A concentração e a vazão de injeção do traçador dependem da diluição prevista do traçador até a última seção de monitoramento, pois é preciso garantir que chegarão nesta seção valores de concentração compatíveis com a sensibilidade dos aparelhos de medida de fluorescência disponíveis. A concentração de injeção é limitada pela solubilidade do traçador (normalmente são utilizadas concentrações em torno de 15%) e a vazão é limitada pelas características do equipamento de injeção.

Uma vez realizado todo o pré-dimensionamento e planejamento, deve-se fazer uma visita ao local do ensaio, onde avalia-se "in situ" a existência de eventuais dificuldades de executar os trabalhos conforme planejado. Esta visita deve também fornecer informações detalhadas do local de injeção e de cada uma das seções de monitoramento.

Para realizar a injeção contínua do traçador é necessário utilizar uma bomba que forneça vazão constante, que possa ser regulada para a vazão do ensaio e que deve ser acoplada a um tanque com a solução de traçador a ser injetada. A Figura V.1 mostra o injetor contínuo utilizado neste ensaio, que foi construído no Laboratório de Traçadores. Este equipamento apresenta um tanque onde a solução de traçador é permanentemente agitada por pás de misturamento acionadas por um motor. Acoplado a esse tanque existe um pequeno reservatório, alimentado por uma pequena bomba centrífuga, que funciona como uma célula de nível constante de modo que o excesso de solução bombeada para a célula retorna para o tanque por um tubo lateral. A célula de nível constante alimenta uma bomba peristáltica de vazão estritamente constante que é regulada para introduzir a solução de traçador no escoamento numa taxa pré-determinada.

Após um tempo longo o suficiente para garantir que o fluxo de traçador na primeira seção é constante, são feitas as coletas de amostras nesta seção, utilizando-se um barco, no espaçamento previamente determinado e assim sucessivamente nas seções seguintes. O posicionamento do barco deve ser feito de modo a garantir que as amostras sejam coletadas alinhadas ao longo da seção transversal e no espaçamento correto.

Em rios de largura pequena ou média (como o rio Paraíba do Sul), o posicionamento do barco ao longo da seção pode ser feito com um cabo fixado em ambas as margens, empregando-se o método utilizado no levantamento da seção transversal com fins hidrométricos. Em rios de grande largura isso torna-se inviável e deve-se recorrer a um posicionamento feito por bases de teodolitos instaladas nas margens (como relatado por YOTSUKURA et alli (1970)) ou a sistemas de posicionamento

automático que utilizam sinais captados de satélites.

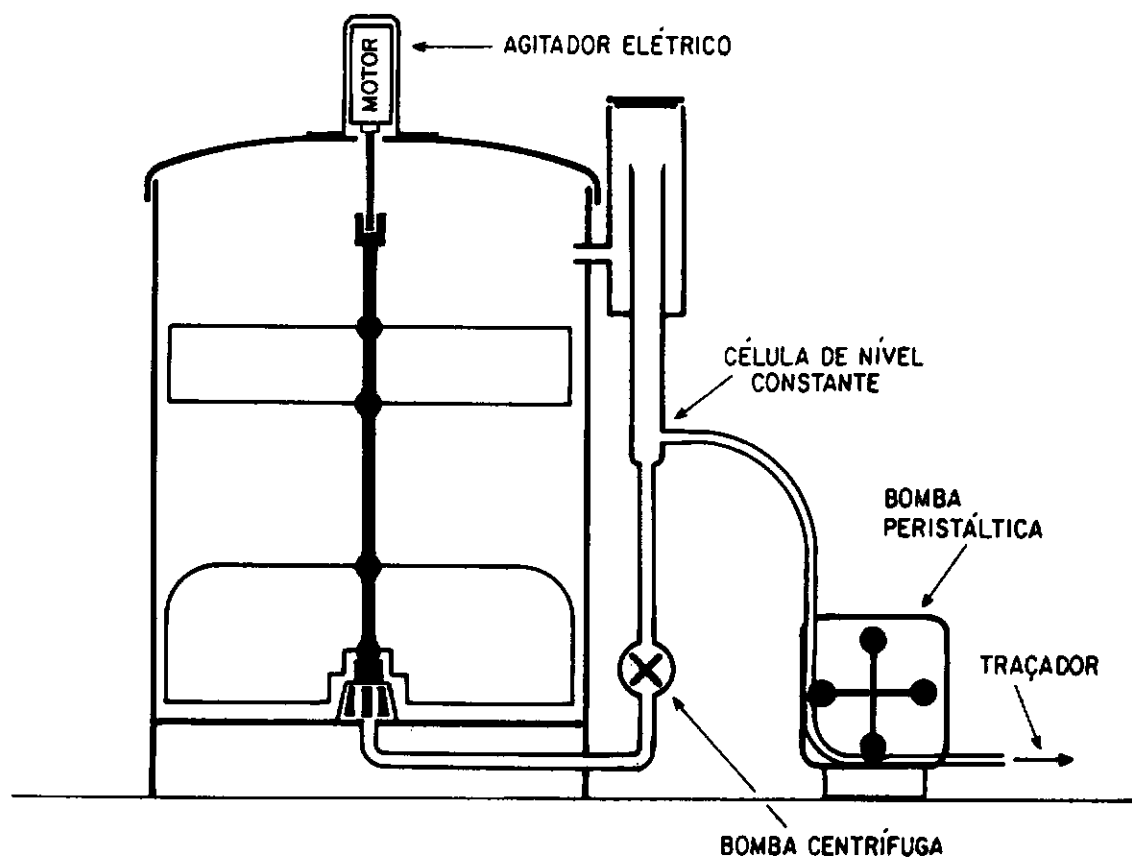


Figura V.1 : Injetor contínuo de traçador.

V-3) Medidas de fluorescência

1 - Medidas no campo

O fluorímetro pode ser utilizado num ensaio de difusão transversal para determinar o momento após a injeção em que o fluxo de traçador torna-se constante na primeira seção de monitoramento, quando começa a coleta de amostras. Pode ainda ser usado para determinar qual deve ser a última seção de monitoramento, aquela onde o traçador já atingiu a margem.

No ensaio realizado o fluorímetro não foi utilizado no campo por falta de um local no barco onde pudesse ser operado

com segurança.

2 - Medidas no laboratório

A determinação da fluorescência líquida de cada traçador nas amostras coletadas neste ensaio foi feita utilizando-se um espectrofluorímetro Jobyn Yvon JY3 com os mesmos procedimentos descritos no item III-3. Para determinação da concentração das amostras foram preparadas retas de calibração como já descrito.

V-4) Ensaio executado

Um ensaio preliminar realizado em junho de 1989 indicou que a 700 m a jusante do local da injeção uma boa parte do traçador já havia alcançado a margem. Como a metodologia a ser utilizada no cálculo do coeficiente de difusão transversal (item V-2) usa dados de curvas onde o traçador ainda não tenha alcançado a margem, a distância de 700 m foi determinada como posição da última seção de monitoramento. No ensaio preliminar determinou-se também que o misturamento lateral completo foi alcançado numa seção situada a 5000 m da injeção. Este valor corresponde a um tempo de aproximadamente duas horas após a injeção, considerando-se que a velocidade típica para o regime de vazão de estiagem verificado em junho no rio Paraíba do Sul é de aproximadamente 0,7 m/s.

Um resultado obtido da análise da ordem de grandeza dos tempos de misturamento em escoamentos naturais feito por FISCHER et alli (1979) indica que o tempo de misturamento vertical é da ordem de cem vezes menor do que o tempo de misturamento transversal. Assim, para o trecho em estudo o tempo de misturamento vertical é da ordem de um minuto, o que equivale a uma distância de 50 m para a velocidade de 0,7 m/s. Desse modo, pode-se garantir que o misturamento vertical já havia sido alcançado na primeira seção, situada a

225 m da injeção. As outras seções de monitoramento foram situadas a 285, 340, 420, 490, 560 e 625 m da injeção, totalizando 7 seções.

Utilizando-se os resultados do ensaio preliminar, a vazão de injeção foi dimensionada em 285 ml/min de uma solução de traçadores composta por 5,0 Kg de Sulforodamina B e 3,0 Kg de Uranina diluídos em 60 l de água. A maior quantidade de Sulforodamina B deve-se a sua menor eficiência de fluorescência (para se obter o valor de fluorescência apresentado pela Uranina, é necessário uma maior concentração de Sulforodamina B).

Esta solução foi injetada continuamente durante 3,5 horas (tempo considerado suficiente para monitorar as 7 seções) utilizando-se o injetor contínuo mostrado na Figura V.1, que foi colocado na extremidade de jusante de uma ilha fluvial. Uma tubulação levava a solução bombeada pela bomba peristáltica até o meio da seção transversal, onde a extremidade da tubulação foi ancorada ficando aproximadamente 50m cm submersa.

Em cada uma das seções de monitoramento foram cravadas estacas em ambas as margens, nas quais amarrava-se uma corda que era passada de uma margem a outra. O barco era conduzido ao longo da corda, coletando uma amostra a cada 3 m. Com larguras de seção em torno de 100 m, este espaçamento significa a coleta de pelo menos 30 amostras em cada seção, que foi considerado um grau de detalhe adequado para o estudo pretendido. As coletas de amostras foram feitas começando-se da seção mais a montante e com o motor do barco desligado para evitar qualquer interferência provocada pela turbulência do motor.

Nas seis primeiras seções foram feitas duas séries de coletas em cada seção, uma indo da margem esquerda para a margem direita (sentido de ida) e outra imediatamente a seguir fazendo o percurso inverso (sentido de volta). Na sétima seção (625 m) foi feita apenas a série de coletas da esquerda para a direita, pois em seguida a injeção foi interrompida. Estas duas séries de coletas em cada seção foram feitas com o objetivo de detectar possíveis mudanças da

distribuição de concentrações na seção no curto intervalo de tempo entre as duas séries de coletas (completava-se cada série em aproximadamente 10 minutos).

As Figuras V.2 a V.4 apresentam as curvas de concentração de Uranina nas duas séries de coletas feitas em cada seção, sendo que na última seção foi feita apenas uma série de coletas. As Figuras V.5 a V.7 apresentam as mesmas curvas para o traçador Sulforodamina B.

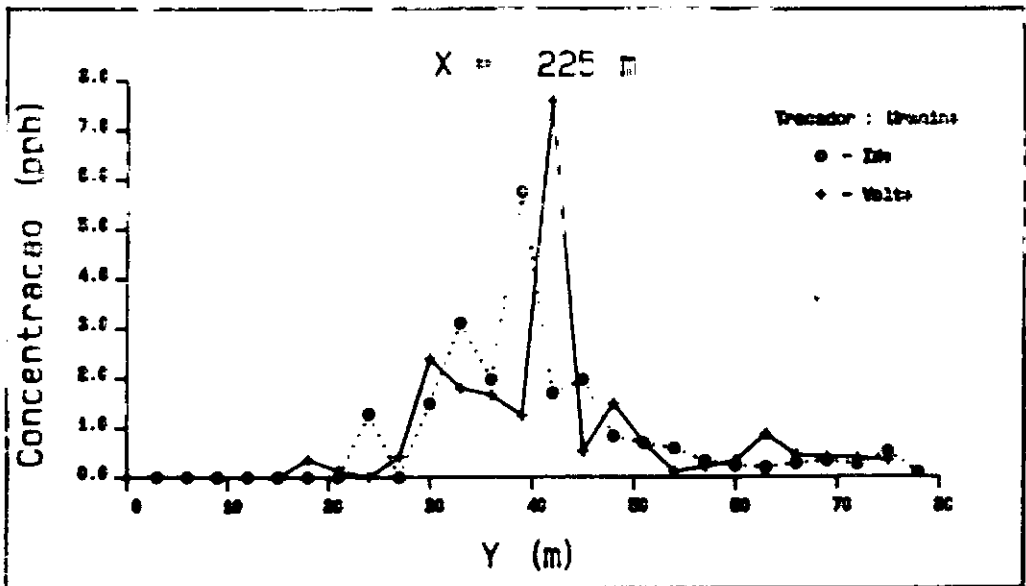


Figura V.2 : Curva de concentração de Uranina nas duas séries de coletas na seção situada a 225 m.

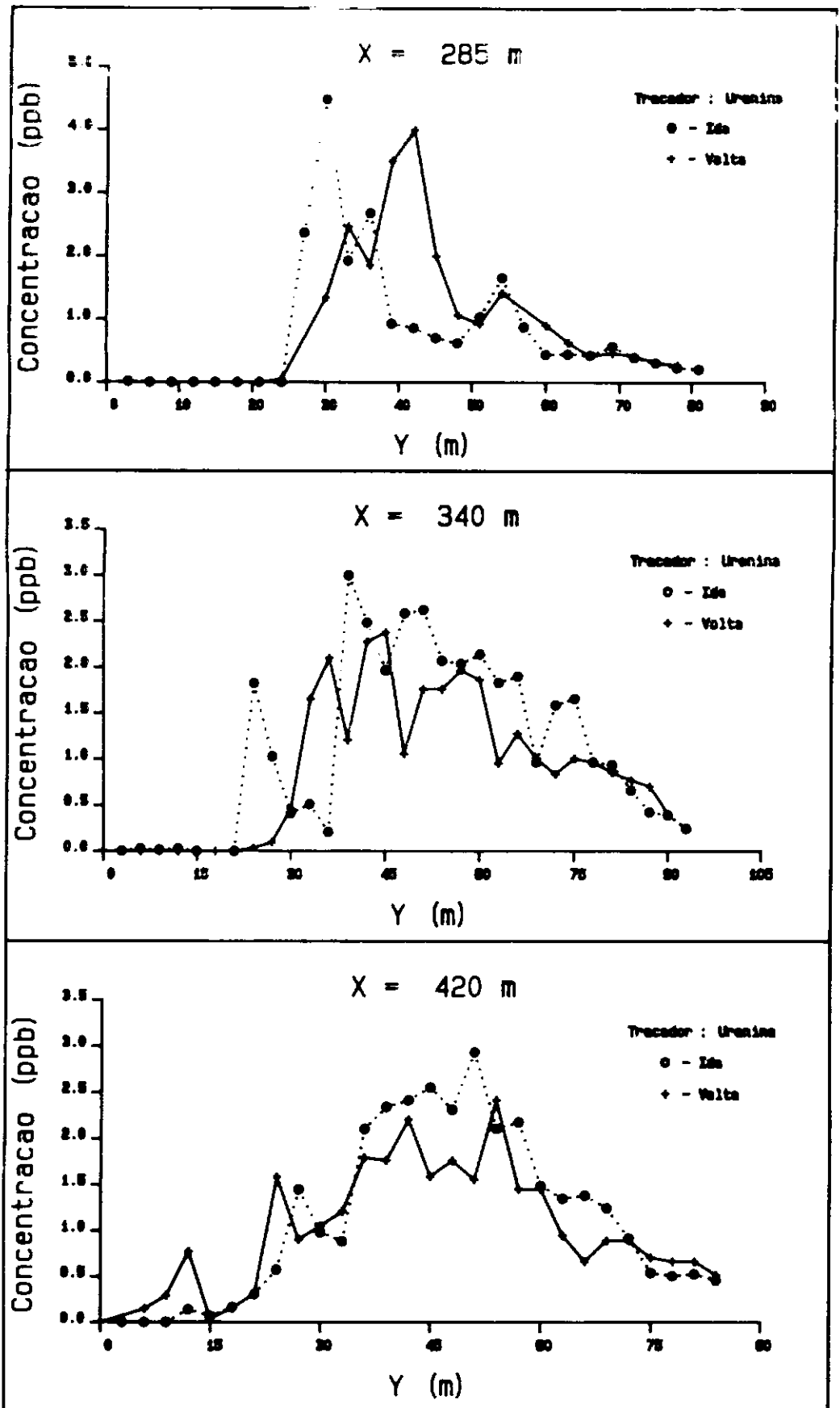


Figura V.3 : Curvas de concentração de Uranina nas duas séries de coletas nas seções situadas a 285, 340 e 420 m.

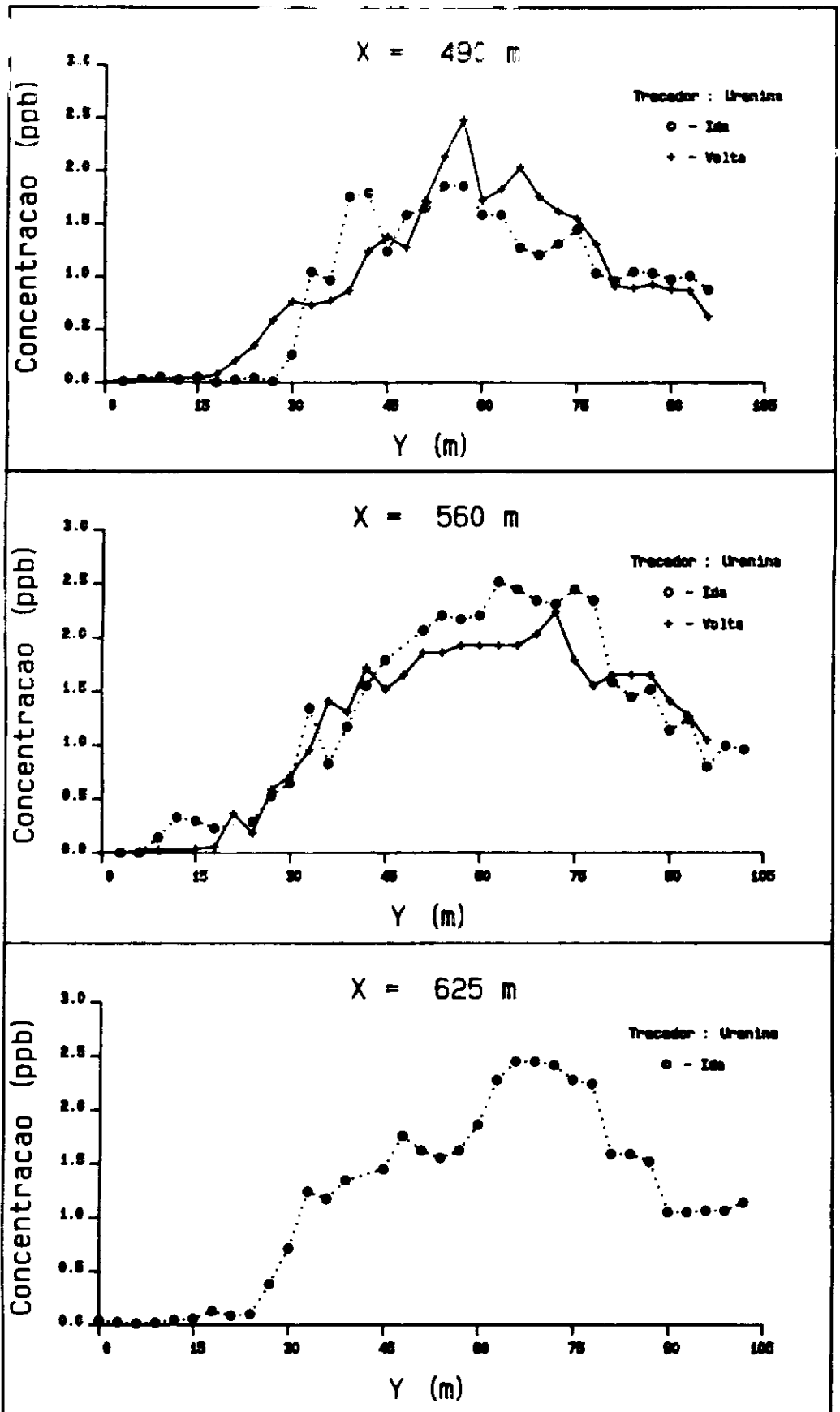


Figura V.4 : Curvas de concentração de Uranina nas duas séries de coletas nas seções situadas a 490, 560 e 625 m.

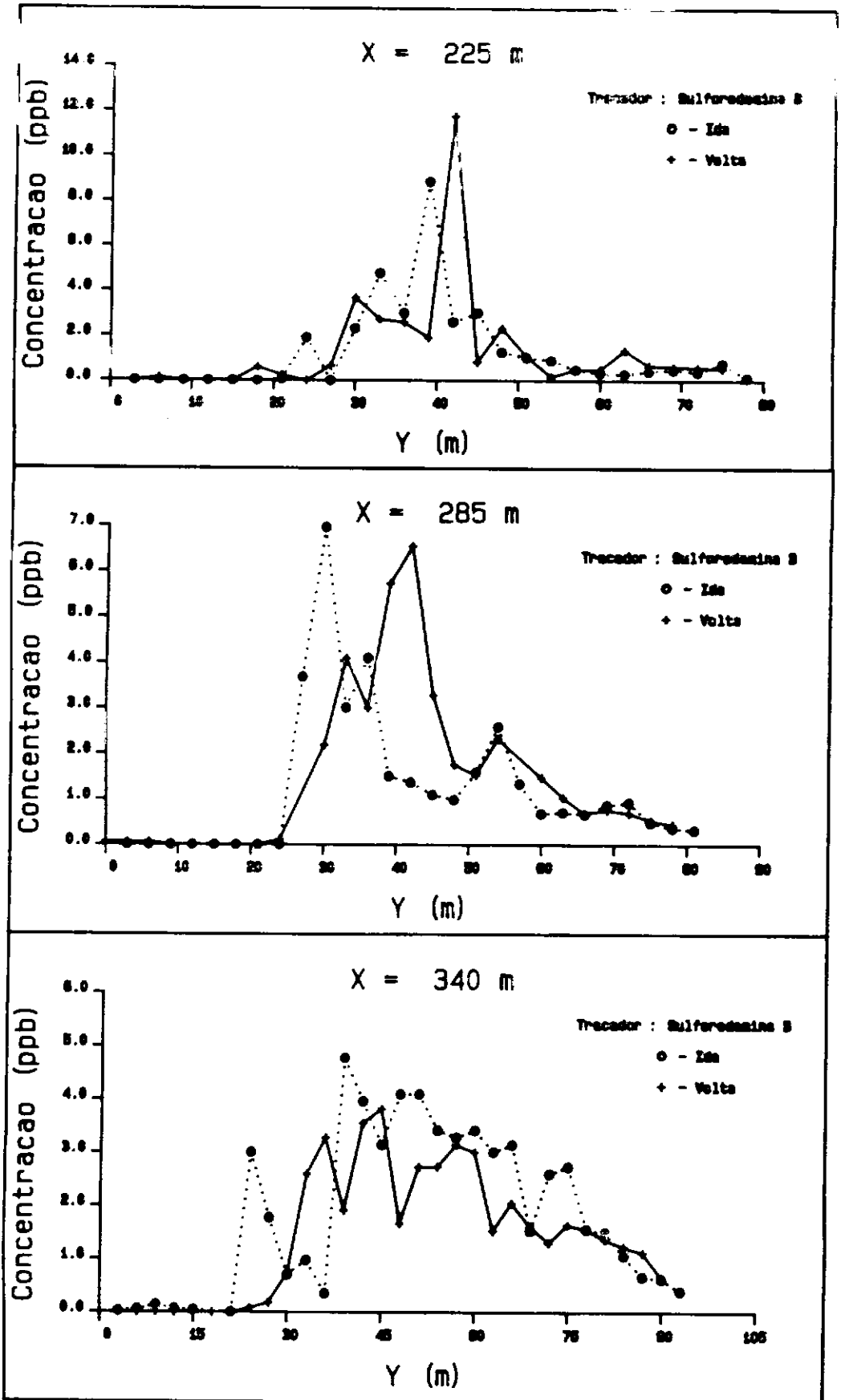


Figura V.5 : Curvas de concentração de Sulfuradamina B nas duas séries de coletas nas seções a 225, 285 e 340 m.

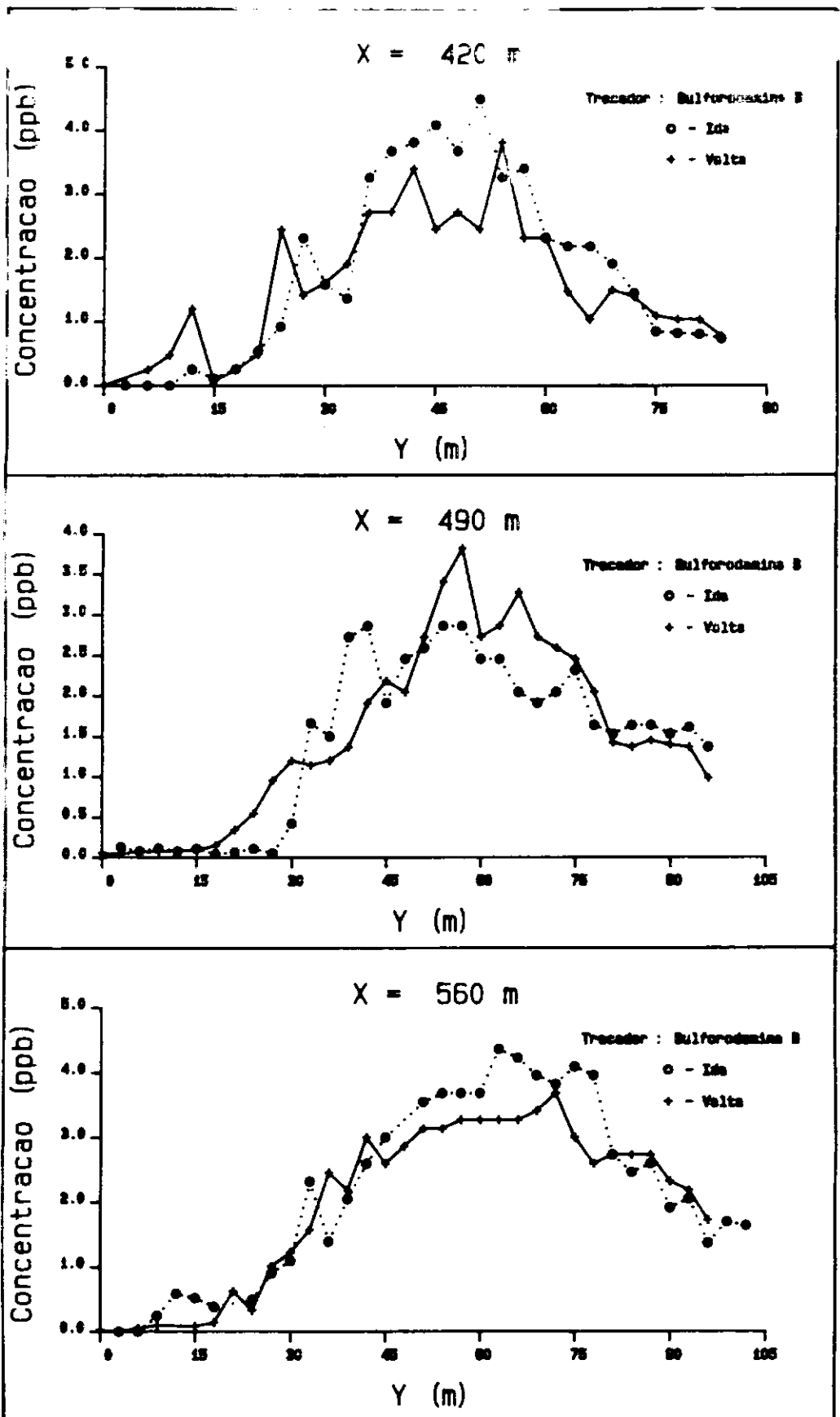


Figura V.6 : Curvas de concentração de Sulforodamina B nas duas séries de coletas nas seções a 420, 490 e 560 m.

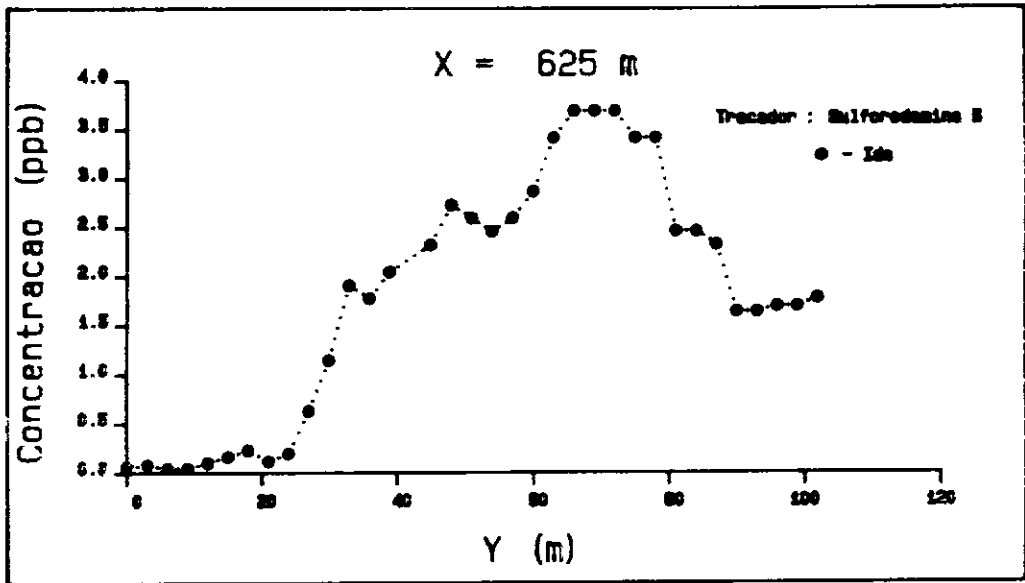


Figura V.7 : Curva de concentração de Sulforodamina B na seção situada a 625 m.

Nas figuras anteriores nota-se uma diferença significativa entre as duas curvas de concentração (ida e volta) de um traçador medidos numa mesma seção. Como estas curvas foram monitorados num intervalo de tempo curto (da ordem de 20 minutos) em um trecho do rio Paraíba do Sul onde a vazão é regulada pela descarga da Usina Hidrelétrica de Funil, essas diferenças não podem ser atribuídas a uma mudança do perfil de velocidades provocado pela alteração brusca no regime de vazões. Ao invés disso, a equipe que fez a coleta de amostras no barco observou a presença de grandes vórtices cujos eixos oscilavam ao longo de cada seção transversal que devem ser responsáveis pela diferenças observadas nas curvas de concentração correspondentes às duas passagens numa mesma seção.

Da comparação das curvas de concentrações de Uranina e de Sulforodamina B provenientes de uma mesma série de coletas numa seção nota-se que estas têm exatamente o mesmo formato, em todas as curvas levantadas, a menos da diferença de amplitude devida às diferentes massas injetadas. No Capítulo

VII é mostrado que não foi observada nenhuma perda mensurável de traçador e portanto a razão existente entre as concentrações de Uranina e Sulforodamina B num mesmo ponto é exatamente a razão entre as massas injetadas.

Pelo fato das formas das curvas de concentração dos dois traçadores referentes a uma mesma série de coletas serem idênticas em todas as seções (a menos da amplitude), pode-se concluir que as flutuações observadas numa mesma curva são devidas à turbulência do escoamento e não a um comportamento particular de qualquer dos traçadores (uma vez que ambos comportaram-se da mesma maneira). Somente a utilização conjunta de dois traçadores permitiu afirmar com segurança que estas flutuações são devidas a características do escoamento e não a contaminações que porventura poderiam ocorrer no acondicionamento e transporte dos frascos ou a problemas com o equipamento de medida de fluorescência.

VI - DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO TRANSVERSAL

Neste capítulo serão utilizadas as metodologias descritas no Capítulo II para determinação de ϵ_y .

VI-1) Fórmula empírica

O valor de profundidade média utilizado no cálculo de ϵ_y foi obtido na medição de vazão realizada em 20/02/86 em Volta Redonda apresentada no Apêndice III, pois nesta medição a vazão ($293 \text{ m}^3/\text{s}$) encontrava-se próxima da vazão no dia do ensaio de difusão transversal ($257 \text{ m}^3/\text{s}$). A declividade da linha d'água foi calculada como descrito no item IV-1, a partir dos níveis da água do rio obtidos dos linígrafos instalados em Volta Redonda e Pinheiral.

Utilizou-se o valor de α médio sugerido por FISCHER et alli (1979) como 0,6.

Com os valores

$$\bar{d} = 3,3 \text{ m}$$

$$S = 0,0003$$

$$\alpha = 0,6$$

tem-se

$$\epsilon_y = 0,19 \text{ m}^2/\text{s}$$

VI-2) Método com uso de traçador

Para se utilizar a formulação apresentada no Capítulo II, deve-se determinar o valor da variância de cada curva de concentrações, calcular a inclinação do gráfico de variância versus distância a injeção e determinar qual a velocidade no

trecho em estudo.

A Figura VI.1 mostra o valor de $d\sigma_y^2/dx$ calculado pelo Método de Mínimos Quadrados com os dados das curvas de concentrações de Uranina para as quatro primeiras seções, tendo sido utilizados os dados das duas séries de coleta (ida e volta) em cada seção. Os valores da variância das três últimas seções são mostrados na figura mas não foram utilizados no cálculo do valor de $d\sigma_y^2/dx$, pois a partir da quinta seção uma quantidade razoável de traçador já havia alcançado as margens. Isto contraria uma das hipóteses básicas de dedução da equação (II.64), que considera o canal como infinitamente largo.

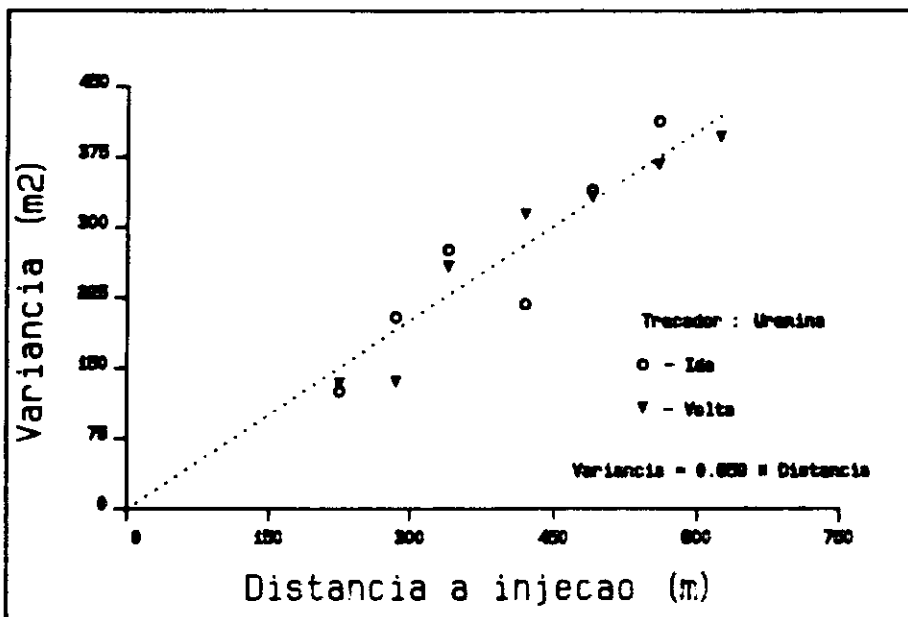


Figura VI.1 : Gráfico de variância versus distância à injeção.

O valor da velocidade utilizado no cálculo de σ_y foi obtido através de um ajuste feito com o método de Convolução da Solução Analítica descrito no item II-1.2, utilizando uma curva de passagem (concentração versus tempo) monitorada numa seção situada a 7200 m da injeção. Esta distância foi escolhida porque os dados obtidos no ensaio preliminar de junho de 1989 indicaram que a 5000 m do local de injeção o traçador estava completamente misturado ao longo da seção transversal. Como o trecho de rio em estudo é bastante

uniforme, admite-se que essa velocidade seja representativa de todo o trecho, inclusive dos primeiros 700 m onde foram levantados os dados do ensaio de difusão transversal.

A curva de passagem de montante utilizada no ajuste mostrado na Figura VI.2 foi obtida simulando-se a massa de Uranina injetada (3,0 Kg) completamente misturada ao longo de toda a seção transversal durante o tempo de duração da injeção (3,5 horas). O ajuste para Sulforodamina B não é mostrado porque, conforme observado no item IV-3, a utilização da correção das áreas sob as curvas leva o ajuste aos mesmos resultados independentemente do traçador utilizado.

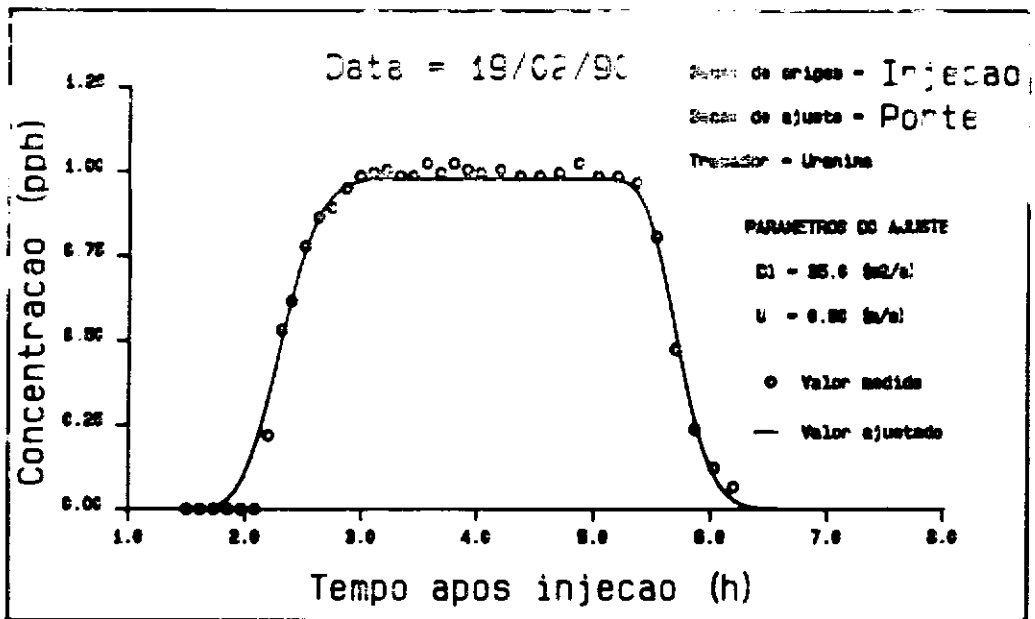


Figura VI.2 : Ajuste da curva de passagem de Uranina na seção situada a 7200 m da injeção.

Com os valores de velocidade e $d\sigma_y^2/dx$ obtidos, calculou-se σ_y como $0,30 \text{ m}^2/\text{s}$ a partir da equação (II.64). O valor de σ_y obtido quando utilizamos os dados das curvas de concentrações de Sulforodamina B foi o mesmo, pois como pode ser observado no Capítulo V, as curvas de concentrações dos dois traçadores têm o mesmo formato. A diferença de amplitude entre estas curvas é devida às diferentes massas injetadas, mas como a variância não é afetada por um fator constante (a

razão entre as massas) que multiplique cada valor de concentração, as variâncias calculadas com as curvas de Uranina são idênticas às calculadas com as curvas de Sulforodamina B.

VI-3) Discussão dos resultados

FISCHER (1967) apresentou um modelo onde mostrava que, em escoamentos naturais, a principal causa da dispersão são as diferenças na velocidade na direção transversal ao fluxo. Mas como visto no item II-2.2, a fórmula desenvolvida por ELDER (1959) utilizada como base da equação (I.63) admite que o perfil de velocidades ao longo da profundidade é o responsável pela dispersão. Assim, o cálculo de ϵ_y pela fórmula empírica apresentada deve ser encarado como uma metodologia que pode fornecer apenas sua ordem de grandeza.

Apesar de todas as simplificações efetuadas na obtenção do modelo utilizado neste trabalho para determinação de ϵ_y , a linearidade observada no crescimento da variância ao longo do trecho estudado permite afirmar que em termos práticos este modelo é suficientemente preciso. Evidentemente que sempre que for possível determinar o perfil de distribuição de velocidades nas seções de monitoramento, deve-se utilizar um modelo mais sofisticado, como os apresentados por HOLLEY, SIEMONS e ABRAHAM (1972) ou BELTAOS (1980).

Conforme mostrado no Capítulo V, as flutuações existentes em cada curva de concentrações e as variações observadas entre as duas séries de coletas em cada seção não foram devidas a características dos traçadores, mas ao comportamento do próprio escoamento. A observação da Figura VI.1 mostra que estas flutuações e variações introduzem uma considerável dispersão nos dados, mas não eliminam o crescimento linear da variância. Uma maneira de melhorar a qualidade dos dados no que diz respeito às flutuações seria

fazendo várias coletas num mesmo ponto da seção e trabalhar com valores médios de concentração em cada ponto.

Outro fato observado é que a variância das distribuições de concentração das três últimas seções (490, 560 e 625 m da injeção) mantêm um crescimento linear, apesar de uma boa parte do traçador já ter alcançado a margem. Isso indica que a hipótese de canal infinitamente largo não é fortemente restritiva para o caso estudado.

VII - DESEMPENHO DE TRAÇADORESVII-1) Introdução

Os traçadores fluorescentes utilizados nos ensaios de dispersão longitudinal e difusão transversal são moléculas orgânicas cuja fluorescência pode ser afetada por uma série de efeitos físicos, químicos e mesmo biológicos. Estes efeitos podem ter um caráter reversível ou irreversível (quando provoca alteração na molécula do traçador, causando assim uma perda parcial da massa do traçador injetado). A sensibilidade de um traçador a um determinado efeito é uma característica particular deste traçador. Por exemplo, a Uranina é bastante sensível a fotodecomposição (efeito irreversível onde acontece a quebra da molécula de traçador pela ação da radiação ultra-violeta). A fluorescência deste traçador também decresce fortemente, em caráter reversível, para valores de pH na faixa entre 4,0 e 6,0. A Amidorodamina G, por sua vez, é pouco afetada pela fotodecomposição (cerca de 70 vezes menos do que a Uranina) e sua fluorescência praticamente não varia na faixa de pH entre 4,0 e 6,0.

Em geral são tomadas precauções para evitar ou minimizar as imprecisões decorrentes de efeitos reversíveis e irreversíveis. Assim, antes de serem analisadas as amostras contendo Uranina são sempre alcalinizadas, a fim de ajustar o pH a um valor próximo de 8,0 pois nesta faixa de pH tem-se sua fluorescência máxima e pouco variável com o pH.

Efeitos irreversíveis devem ser minimizados, pois a perda do traçador injetado pode induzir erros sensíveis nos resultados de um ensaio, já que em geral a necessidade de conservação da massa é uma hipótese básica nos métodos envolvendo o uso de traçador. Para minimizar a ocorrência de fotodecomposição, as amostras são acondicionadas em recipientes escuros e para evitar a biodegradação são preservadas com a adição de bactericida, como por exemplo o

clorofórmio. É importante assinalar que estas medidas de precaução só são válidas para amostras já coletadas, pois não é possível evitar que esses dois efeitos ocorram enquanto o traçador está dentro do rio.

De modo a avaliar a influência de efeitos irreversíveis nos traçadores utilizados nos ensaios realizados na bacia do rio Paraíba do Sul, foram feitas injeções de dois traçadores simultaneamente, sendo um deles utilizado como traçador de referência (suposto não sujeito a perdas de massa). Os dados apresentados por BENISCHKE (1989) indicam que em ensaios de laboratório a Uranina perdeu 50% da sua massa após um período de exposição de apenas 1,8 horas a uma luz artificial equivalente à luz do dia. Por causa dessas perdas elevadas, a Uranina é utilizada com muitas reservas em estudos de Hidrologia de Superfície. Por ser um traçador com pequena sensibilidade a adsorção, é muito utilizado em Hidrologia Subterrânea, onde a fotodecomposição não é um problema.

A intenção do estudo realizado neste trabalho foi de obter dados que permitissem comparar o desempenho da Uranina em relação a outros traçadores em rios tropicais (onde a insolação é alta) que normalmente são sujeitos a uma alta carga de sedimentos em suspensão. Os traçadores utilizados como referência foram a Amidorodamina G e a Sulforodamina B, que apresentam uma resistência a fotodecomposição cerca de 70 vezes superior à da Uranina e são largamente empregados em Hidrologia de Superfície. O interesse na utilização da Uranina se deve ao fato que esta é encontrada no mercado nacional a um preço bastante inferior aos demais traçadores, que são importados.

Serão apresentados os resultados dessa análise comparativa, que foi dividida levando-se em conta o tempo médio de trânsito do traçador entre o local de injeção e os locais de coleta. Os ensaios de dispersão longitudinal foram classificados como de longa duração pois este tempo de trânsito foi superior a 10 horas em todos os ensaios realizados. O ensaio de difusão transversal foi classificado como de curta duração, pois o tempo médio de trânsito dos traçadores no escoamento foi de apenas 12 minutos.

VII-2) Ensaaios de longa duração

Dos efeitos irreversíveis que mais comumente podem afetar um traçador quando este se encontra dentro do corpo d'água (fotodecomposição, biodegradação, reação química), acredita-se que a fotodecomposição seja responsável por uma importante parcela das perdas de traçador verificadas. Nos ensaios de longa duração realizados as possíveis perdas devidas aos outros efeitos não foram observadas.

Em várias reanálises de amostras de água do rio Paraíba do Sul que não foram preservadas com bactericida, realizadas após um tempo de estocagem de algumas semanas, foram observadas perdas atribuídas a biodegradação. Os gráficos de fluorescência obtidos com o espectrofluorímetro apresentavam oscilações e anomalias (crescentes com o passar do tempo) que não se verificam na varredura de uma amostra normal. Como nas varreduras das amostras dos ensaios nunca apareceram tais anomalias, pode-se afirmar que a biodegradação não é responsável pelas perdas de traçador verificadas.

Perdas por reação química normalmente têm um caráter puntual, ou seja, na seção de monitoramento imediatamente a jusante do local em que esta ocorresse haveria uma queda na concentração de traçador que não se verificaria nas seções seguintes, ao contrário das perdas observadas nos ensaios realizados, que foram verificadas ao longo de todo o rio. Apesar do rio Paraíba do Sul e do rio Guandu serem considerados bastante poluídos, a concentração de agentes oxidantes que poderiam destruir a molécula de traçador deve ser pequena. Isto porque um material oxidante ao ser lançado no escoamento (além de sofrer uma diluição natural) encontra uma quantidade de material orgânico dissolvido com a qual vai reagir, diminuindo progressivamente a quantidade de oxidante remanescente. Seria também esperado que as perdas por combinação química ocorressem com os dois traçadores, enquanto nos ensaios realizados foram verificadas apenas perdas de Uranina.

A Figura VII.1 apresenta as curvas de passagem de

Uranina e de Amidorodamina G na seção S4 do ensaio de 09/09/86, onde se nota o mesmo comportamento dos dois traçadores no que diz respeito à forma da curva e ao tempo de chegada na seção. Nesta figura, esperava-se também que as áreas sob as curvas de passagem fossem iguais, uma vez que foram injetadas simultaneamente 10 Kg de cada traçador. A razão disso não se verificar é a perda de massa de Uranina.

Para facilitar a avaliação da perda de massa de Uranina observada, foram construídos gráficos como o mostrado na Figura VII.2, onde a razão adimensional R é calculada utilizando-se valores de concentrações relativas às massas injetadas a partir da equação:

$$R(t) = \frac{C_{ura}(t) / M_{ura}}{C_{ref}(t) / M_{ref}} \quad (VII.1)$$

onde: R = razão entre concentrações relativas (adm)

C_{ura} = concentração de Uranina (ppb)

C_{ref} = concentração do traçador de referência
(Amidorodamina G ou Sulforodamina B) (ppb)

M_{ura} = massa de Uranina injetada (Kg)

M_{ref} = massa do traçador de referência injetado (Kg)

Na construção deste gráfico foram desconsiderados alguns pontos de baixas concentrações existentes no início e no fim de cada curva de passagem. Esse "truncamento" se deve ao fato de que as imprecisões analíticas inerentes ao processo de medida de fluorescência fazem com que os valores de R (t) nesses pontos oscilem aleatoriamente. A linha horizontal corresponde ao valor da média de todos os valores de R (t).

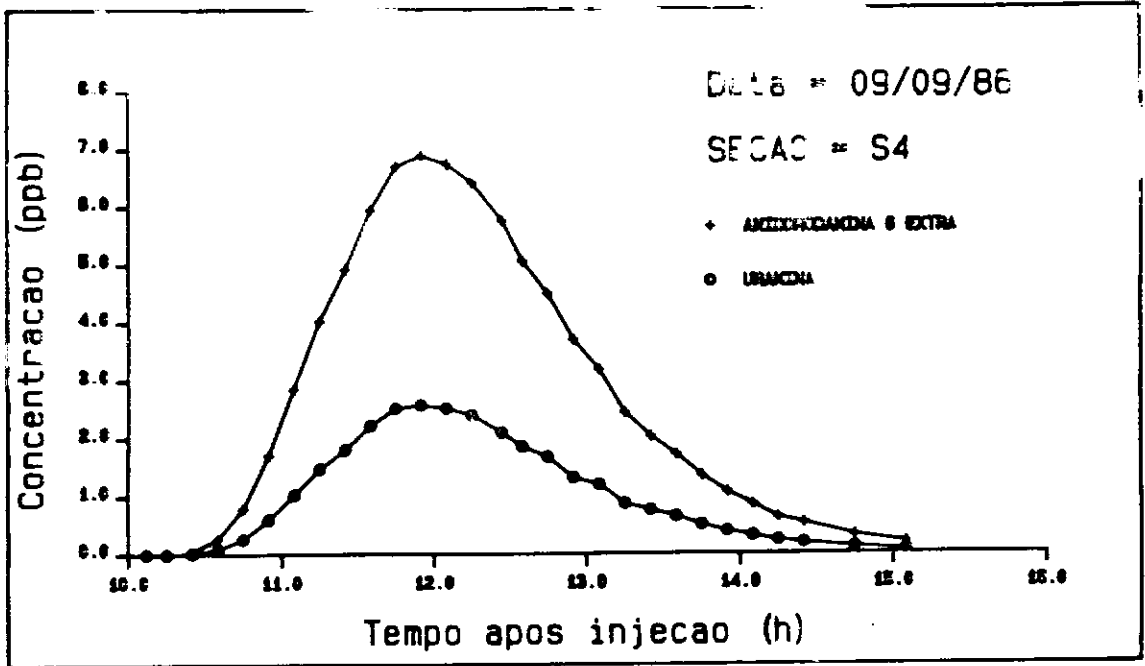


Figura VII.1 : Curvas de passagem de Uranina e de Amidorodamina G na seção S4 do ensaio de 09/09/86.

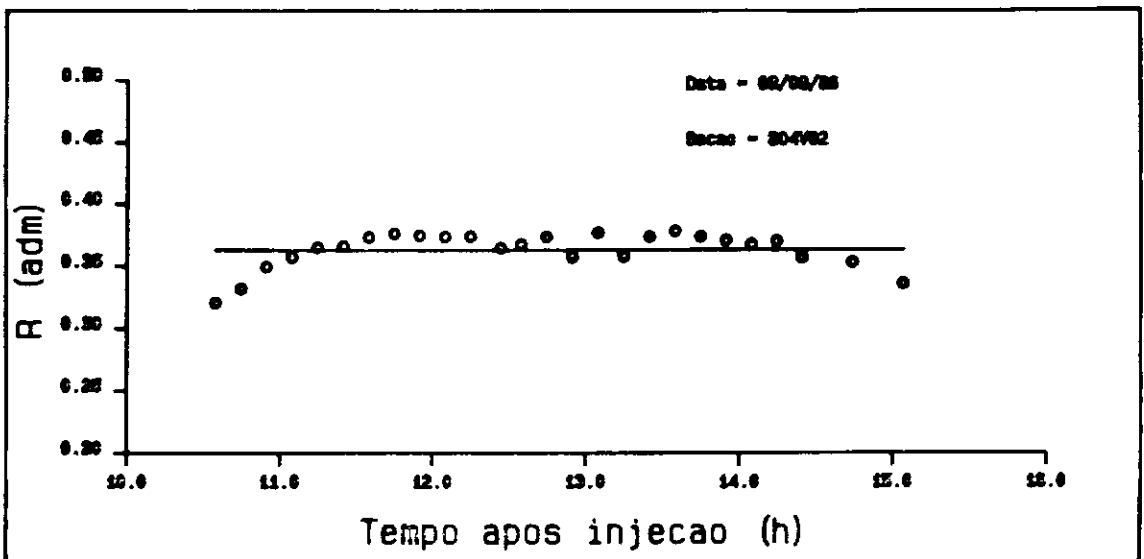


Figura VII.2 : Perda de Uranina na seção S4 do ensaio de 09/09/86

Caso não houvesse perda de Uranina, os valores de $R(t)$ na Figura VII.2 seriam iguais a 1,0. Como isso não se

verifica, pode-se afirmar que há uma diferença de desempenho entre os traçadores com relação a perda de massa. A diferença $1 - R(t)$ indica o quanto de massa de Uranina foi perdida em relação à massa do traçador de referência. O gráfico da Figura VII.2 indica uma perda de aproximadamente 65% da massa de Uranina em relação a Amidorodamina G.

Como se nota na Figura VII.2 e nos demais gráficos mostrados no Apêndice III, os valores de $R(t)$ numa mesma seção são praticamente constantes. De modo a sintetizar os dados obtidos em uma seção de monitoramento foi definida uma razão média R_m pela equação:

$$R_m = \frac{\left(\sum_{i=1}^n R(t) \right)}{n} \quad (\text{VII.2})$$

onde: R_m = razão média entre concentrações relativas numa mesma seção (adm)

n = número de valores de $R(t)$

Para facilitar a avaliação da perda relativa de Uranina em relação aos traçadores de referência em função do tempo de duração do ensaio, foram construídos gráficos como o da Figura VII.3, no qual os horários referentes a cada valor de R_m são os horários correspondentes ao centro de gravidade das curvas de passagem.

O gráfico da Figura VII.4 apresenta dados de R_m para as seções S1, S2, S3, S4 e S6, exceto nos ensaios dos dias 08/01/87 e 29/01/87, nos quais não foi monitorada a curva de passagem na seção S3. Como as seções S4 e S5 situam-se muito próximas, serão apresentados somente os dados da seção S4, que são mais completos pois as coletas eram feitas numa ponte. Nas seções em que foram monitoradas mais de uma vertical, o valor de R_m apresentado corresponde ao da vertical situada no meio da seção transversal (vertical 04 nas seções S1 e S2 e vertical 02 na seção S4).

O fato de que na seção S1 os traçadores não estão

completamente misturados ao longo da seção transversal não tem importância para este estudo, pois a injeção dos dois traçadores foi feita simultaneamente e as características de ambos em relação ao misturamento são as mesmas (como visto no Capítulo V).

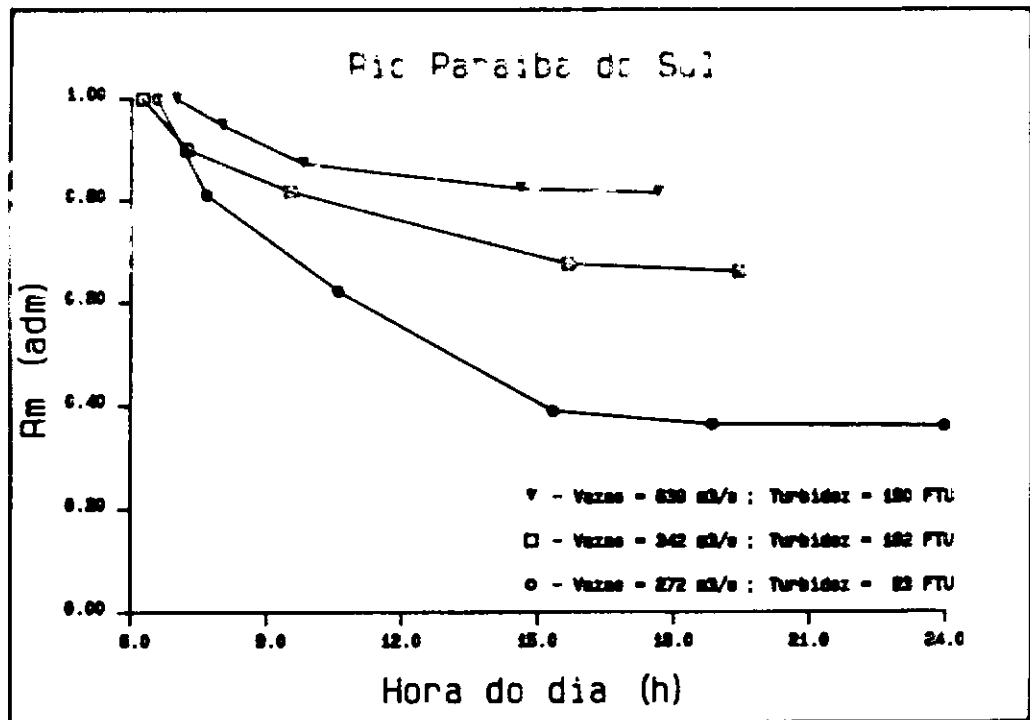


Figura VII.4 : Perda de Uranina em relação a Amidorodamina G em função da turbidez.

Neste gráfico nota-se que as menores perdas relativas correspondem ao máximo valor de turbidez. Isto significa que os materiais em suspensão responsáveis pelo aumento da turbidez provocaram uma blindagem para a Uranina em relação a radiação solar, reduzindo assim as perdas provocadas por fotodecomposição. Observa-se ainda que as maiores perdas ocorreram no horário entre 8:00 e 16:00 horas, quando ocorre maior incidência de radiação solar, e que praticamente não se verificam perdas após o anoitecer. Isso confirma a hipótese de que as perdas de traçador neste tipo de ensaio são devidas principalmente a fotodecomposição.

A Figura VII.5 mostra os valores de Rm para o ensaio de

15/12/87 (onde foram empregados Uranina e Sulforodamina B) nas seções S1, S2, S3, S4 e S6. Os critérios utilizados na construção deste gráfico foram os mesmos da Figura VII.4.

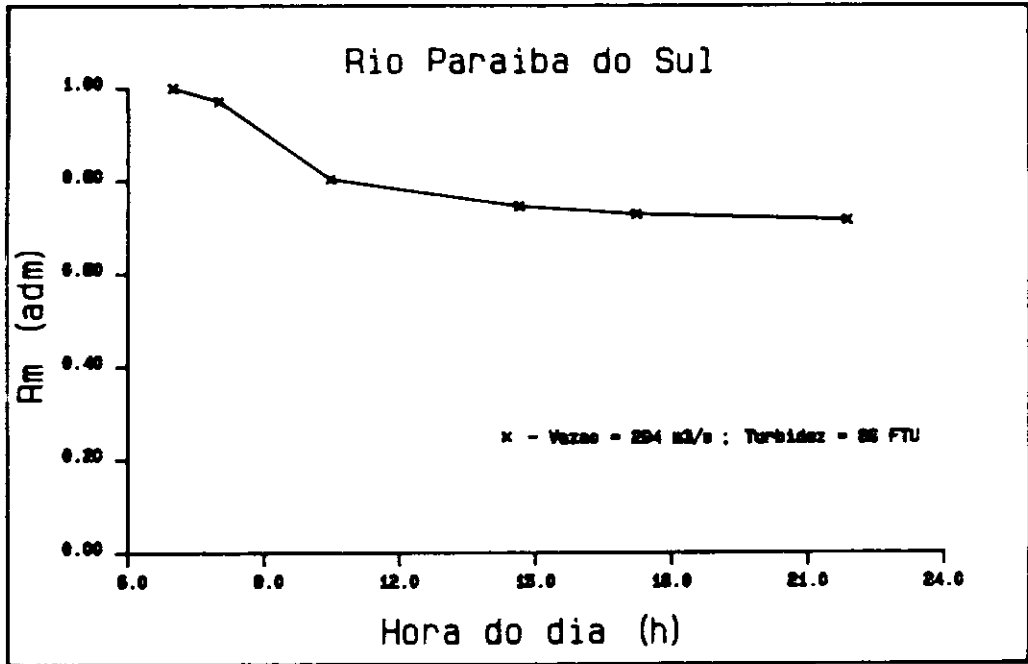


Figura VII.5 : Perda de Uranina em relação a Sulforodamina B.

Nota-se que o valor de turbidez deste ensaio, apesar de ser menor do que o do dia 08/01/87, leva a valores de Rm maiores. Assim, neste ensaio as perdas de Uranina por fotodecaimento foram menores do que era esperado. Isso aconteceu porque durante a realização deste ensaio o céu encontrava-se nublado, diminuindo assim a incidência de luz sobre a Uranina dentro do rio. Aqui também observou-se que as maiores perdas ocorreram entre 8:00 e 16:00 horas.

Os valores de turbidez mostrados nas figuras VII.4 e VII.5 são médias ao longo de todo o rio que foram calculadas utilizando-se os dados do Quadro VII.1, levantados durante a realização dos ensaios.

Quadro VII.1 : Valores de turbidez da água do rio Paraíba do Sul durante os ensaios de dispersão longitudinal.

09/09/86		08/01/87	
Seção	Turbidez (FTU)	Seção	Turbidez (FTU)
S1	21	S1	170
S2	22	S2	165
S3	25	S3	155
S4	22	S6	167

29/01/87		15/12/87	
Seção	Turbidez (FTU)	Seção	Turbidez (FTU)
S1	197	S1	85
S2	193	S2	80
S4	180	S3	93
S6	198	S4	83

A Figura VII.6 apresenta o gráfico de R_m para o ensaio de 28/02/91, onde foram usados Uranina e Amidorodamina G.

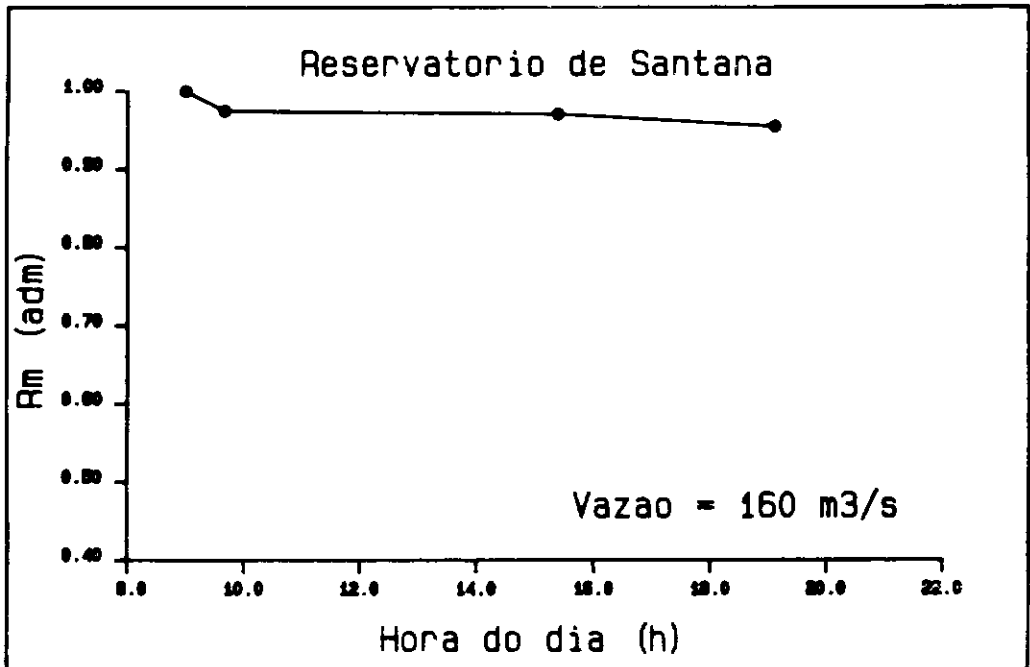


Figura VII.6 : Perda de Uranina em relação a Amidorodamina G no ensaio de 28/02/91 no Reservatório de Santana.

Como se observa na Figura VII.6, apesar do tempo de duração do ensaio ter sido grande (aproximadamente 10 horas) as perdas de Uranina em relação a Amidorodamina G foram muito pequenas. Mesmo não tendo sido levantados dados de turbidez da água do reservatório durante o ensaio, as equipes de coleta de amostras observaram visualmente que a água continha alta concentração de sedimentos em suspensão, apresentando uma cor amarelo-avermelhada característica dos sedimentos argilosos de rios em época de chuvas.

A Figura VII.7 apresenta o gráfico de R_m para o ensaio de 26/02/91, realizado no Ribeirão das Lajes e no rio Guandu, onde foram usados Uranina e Amidorodamina G.

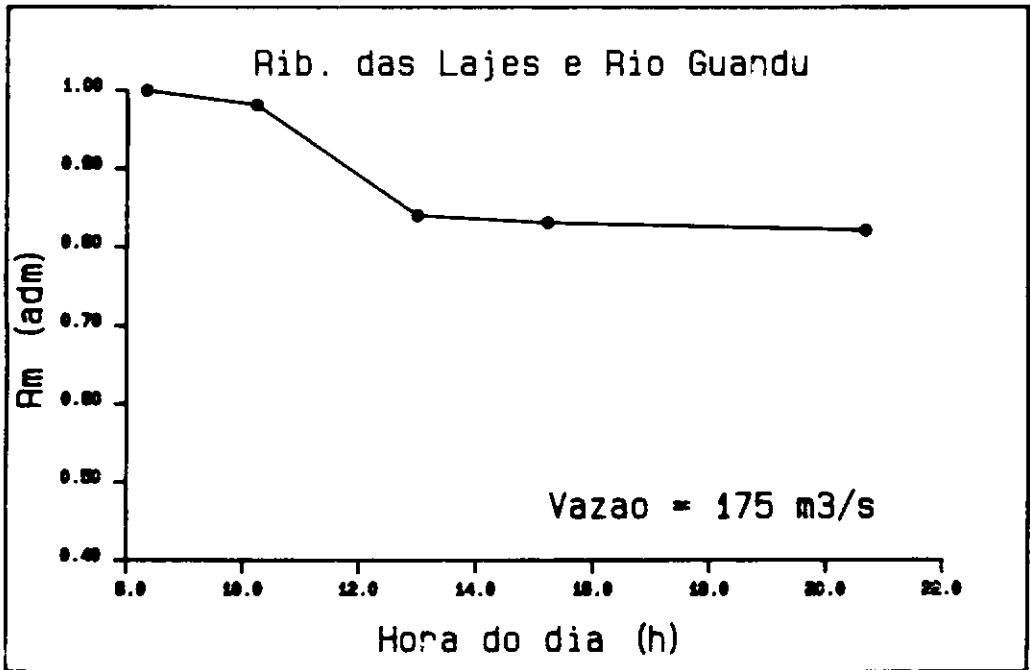


Figura VII.7 : Perda de Uranina em relação a Amidorodamina G no ensaio de 26/02/91 no Ribeirão das Lajes e rio Guandu.

Nota-se nesta figura que houve uma perda pronunciada de Uranina entre as seções LG351 e LG352, que coincide com um horário de grande insolação, e a partir do anoitecer praticamente não se observam perdas. Não foram monitorados valores de turbidez da água do rio, mas a localização deste trecho permite afirmar que estes valores devem ser menores do

que no Reservatório de Santana. Apesar da água que escoo neste trecho ser a mesma que passou pelo Reservatório de Santana, entre este reservatório e o Ribeirão das Lajes existem dois outros reservatórios (Ponte Coberta e Vigário), que por sua baixa velocidade de escoamento funcionam como decantadores dos sedimentos provenientes do rio Paraíba do Sul. Assim, a menor quantidade de sedimentos na água do Ribeirão das Lajes deve ser a causa da maior perda de Uranina verificada.

Esse estudo de comparação de desempenho não foi estendido aos reservatórios de Vigário e Ponte Coberta, por causa do alto custo da grande quantidade de traçador de referência que seria necessária.

VII-2) Ensaio de curta duração

As perdas de massa de traçador num ensaio deste tipo devem ocorrer principalmente em consequência de algum tipo de combinação da molécula do traçador com substâncias químicas presentes ao escoamento. Isso porque o tempo de permanência dos traçadores na água do rio é pequeno neste tipo de ensaio, e as perdas por fotodecomposição ou biodegradação necessitam de um tempo maior para se manifestarem (conforme visto no item VII-1). Para avaliar eventuais perdas, foram construídos gráficos da razão adimensional R de modo similar ao realizado no item VII-1. A única diferença é que neste ensaio as concentrações estão relacionadas à coordenada transversal (y) e não ao tempo, como nos ensaios de dispersão longitudinal.

A Figura VII.8 apresenta as curvas de concentração de Uranina e de Sulforodamina B na seção a 625 m e a Figura VII.9 mostra o gráfico de R (y) correspondente a estas curvas. Na construção deste gráfico também foram truncados os pontos de concentrações muito baixas, pois as imprecisões analíticas introduzem muitas oscilações.

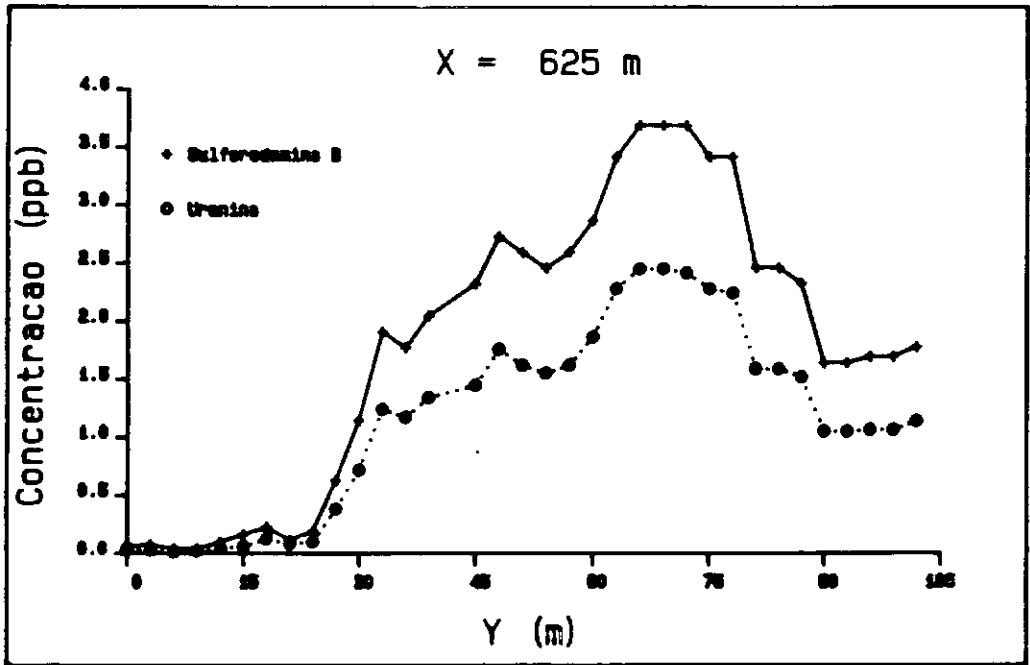


Figura VII.8 : Perfis de concentração de Uranina e Sulforodamina B na seção a 625 m.

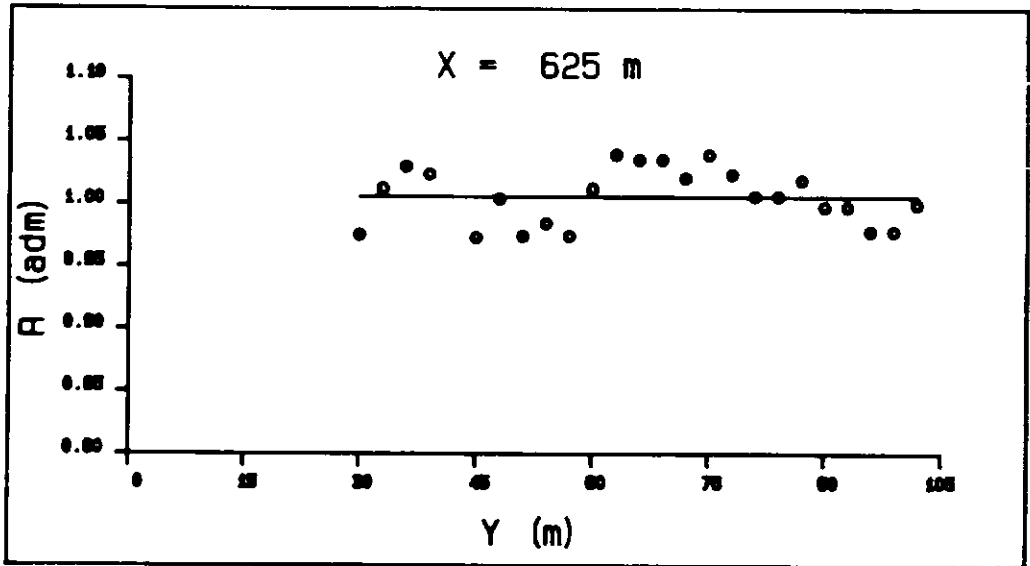


Figura VII.9 : Perda de Uranina na seção a 625 m.

Da observação da Figura VII.8 nota-se que os traçadores injetados comportaram-se do mesmo modo, pois as formas das duas curvas são muito semelhantes (a menos da amplitude, pois como visto no Capítulo V, foram injetadas massas diferentes dos dois traçadores). Este comportamento idêntico já havia

sido observado nos ensaios de dispersão longitudinal, pois as curvas de passagem de dois traçadores numa seção também têm o mesmo formato como visto no item VII-1. A Figura VII.8 mostra que isto ocorre mesmo a uma pequena distância da injeção.

Na Figura VII.9, onde já está considerada a correção das massas, verifica-se que o valor médio de $R(y)$ está muito próximo de 1,0, sendo as flutuações observadas devidas a imprecisões analíticas. Isto significa que não foi observada nenhuma perda mensurável de Uranina em relação a Sulforodamina B nesta seção, que é a mais distante da injeção. Os gráficos de $R(y)$ para as demais seções são apresentados no Apêndice III, onde são mostrados apenas os gráficos resultantes das coletas feitas no sentido de ida (da margem esquerda para a margem direita), pois os gráficos das coletas feitas no sentido de volta apresentam resultados idênticos.

Como se verifica nos gráficos do Apêndice III, os valores de $R(y)$ numa seção são praticamente constantes, assim pode-se construir um gráfico com valores de R_m para este ensaio do mesmo modo feito para os ensaios de longa duração. A Figura VII.10 abaixo mostra o gráfico resultante.

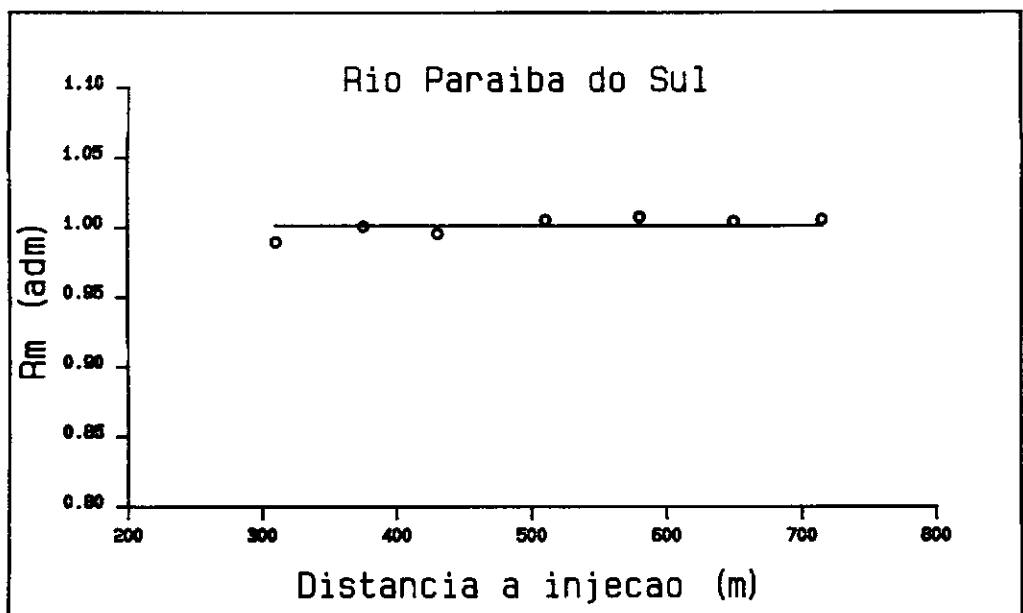


Figura VII.10 : Perda de Uranina no ensaio de difusão transversal.

Como os valores de R_m mantiveram-se ao longo de todas as seções em torno de 1,0, pode-se concluir que neste ensaio de curta duração a Uranina teve um desempenho tão bom quanto o do traçador de referência Sulforodamina B, não apresentando perdas mensuráveis de massa por fotodecomposição ou por combinação com substâncias presentes ao escoamento.

VIII - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As fórmulas empíricas utilizadas para determinar-se o coeficiente de dispersão longitudinal (D_L) apresentaram uma grande variação de resultados, todas superdimensionando os coeficientes para o rio Paraíba do Sul, considerando que os valores medidos experimentalmente estiveram em torno de $35 \text{ m}^2/\text{s}$. À exceção da fórmula de McQuivey e Keefer, as demais apresentaram pouca sensibilidade a vazão e uma alta sensibilidade à escolha de uma seção transversal representativa do trecho. Embora a fórmula de Petersen tenha apresentado valores mais próximos aos medidos experimentalmente, o conjunto dos resultados obtidos com as fórmulas empíricas ratifica a idéia de que sua utilização é perigosa e deve se resumir apenas a estudos bastante preliminares.

A determinação de D_L pelos métodos analíticos levou a resultados mais próximos dos determinados experimentalmente, embora com forte variação dos valores obtidos, o que dificulta a escolha de um valor final de D_L . Apesar de basearem-se em dados adicionais mais elaborados (perfil de velocidades e geometria detalhada da seção transversal), seus resultados são bastante influenciados pela escolha de uma seção representativa do trecho. Como as seções para as quais existem dados geométricos e hidráulicos são normalmente as empregadas para fins hidrométricos (cujos critérios de seleção não levam em conta a representatividade do trecho), a utilização dos métodos de Fischer e Jain nestas seções fica ainda mais comprometida e seus resultados não confiáveis.

O tradicional método de Variação dos Momentos apresenta valores consistentemente mais altos para D_L do que os calculados pelos métodos de ajuste (Propagação de Fischer e Convolução da Solução Analítica). Isto ocorreu mesmo quando aplicado a curvas fracamente assimétricas nas quais foi

aplicado o procedimento de truncamento de concentrações abaixo de 3% do valor máximo. Conclui-se que o método de Variação de Momentos, apesar de sua simplicidade, é uma ferramenta precária e inadequada para analisar os resultados fornecidos por um ensaio, relativamente sofisticado, realizado com traçador.

Os resultados obtidos para DL através dos métodos de ajuste, quando aplicados aos trechos onde as curvas experimentais mostraram pouca assimetria, apresentaram valores bastante semelhantes entre si. Quando aplicados aos trechos em que as curvas experimentais mostraram uma assimetria acentuada, o método de Convolução da Solução Analítica forneceu ajustes melhores que os demais.

O método de Propagação de Fischer gera uma curva de jusante que é quase totalmente simétrica, independentemente da seção de montante utilizada, e que coincide sempre seu centro de gravidade com o da curva experimental, não importa qual o valor da velocidade. Isso leva a ajustes piores do que os feitos com outros métodos, principalmente quando a curva ajustada é assimétrica.

O método da Solução de Taylor, por ser aplicável apenas a trechos definidos desde a injeção, tem seu uso limitado, não podendo determinar DL para trechos intermediários. Nos trechos em que este método foi aplicado, os resultados obtidos foram os mesmos encontrados com o método de Convolução da Solução Analítica.

O método de Convolução da Solução Analítica mostrou-se o mais abrangente, levando a bons resultados em trechos nos quais os outros métodos não tiveram bom desempenho. Isto se deve principalmente à característica deste método de gerar curvas assimétricas para a seção de jusante quando utiliza uma seção experimental de montante que também é assimétrica.

Verificou-se que a utilização da metodologia apresentada

neste trabalho para correção das áreas das curvas de passagem empregadas nos ajustes conduz ao valor correto para o coeficiente de dispersão longitudinal, independente da ocorrência de perdas de traçador ou aumento de vazão no trecho.

O atual estágio das técnicas analíticas de determinação de concentração de traçadores fluorescentes permite a determinação de curvas de passagem com bastante precisão (em torno de 2%), de tal modo que o cálculo de valores de D_L com os métodos de ajuste leva a resultados pelo menos uma ordem de grandeza mais precisos do que os 200% admitidos por Fischer em 1979.

Nos ensaios de determinação de D_L o traçador Uranina, apesar de sofrer perdas por fotodecomposição, mostrou-se tão eficiente quanto os traçadores Amidorodamina G e Sulforodamina B (normalmente admitidos como conservativos) quando utilizada a metodologia de correção das áreas das curvas (correção de perdas).

A utilização de dois traçadores no ensaio de difusão transversal permitiu obter uma importante confiança com relação à representatividade dos dados obtidos, que não seria possível caso apenas um traçador tivesse sido empregado. Foi possível provar que as flutuações observadas nas curvas de concentração eram devidas ao próprio escoamento por causa do uso de um traçador adicional. Neste ensaio não foram observadas perdas de Uranina quando comparada à Sulforodamina B, o que indica que em ensaios de curta duração como este a Uranina pode ser utilizada como traçador conservativo.

Comprovou-se, pelo menos qualitativamente, um favorável efeito da turbidez (normalmente observada em rios tropicais) na diminuição das perdas por fotodecomposição da Uranina. Recomenda-se que os resultados obtidos neste trabalho sejam complementados com ensaios adicionais, melhor controlados, de modo a se poder estabelecer relações quantitativas seguras.

IX - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEER, T. e YOUNG, P. C. (1983), "Longitudinal Dispersion in Natural Streams", Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 109, pp 1049-1067.
- BELTAOS, S. (1980), "Transverse Mixing Tests in Natural Streams", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 106, pp 1607-1625.
- BENISCHKE, R. (1989), "Fluorescent Tracers in Hidrology", Institute for Geothermics and Hydrogeology - Graz (Austria), 77 p..
- ELDER, J. W. (1959), "The Dispersion of Marked Fluid in Turbulent Shear Flow," Fluid Mechanics, Vol 5, Part 4, pp 544-560.
- FISCHER, H. B. (1967), "The Mechanics of Dispersion in Natural Streams", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 93, pp 187-216.
- FISCHER, H. B. (1968), "Dispersion Predictions in Natural Streams", Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol. 94, pp 927-941.
- FISCHER, H. B. (1968), "Methods for Predicting Dispersion Coefficients in Natural Streams, with Applications to Lower Reaches of the Green and Duwamish Rivers Washington", Professional Paper No. 582-A, U.S. Geological Survey.
- FISCHER, H. B., LIST, E. J., KOH, R. C. Y., IMBERGER, J., e BROOKS, N. H. (1979), "Mixing in Inland and

Coastal Waters", Academic Press, Inc., New York, N.Y..

GENUCHTEN, M. T., ALVES, W. J. (1982), "Analytical Solutions of One - Dimensional Convective - Dispersive Solute Transport Equation", U.S. Department of Agriculture, Technical Bulletin, No 1661, 151 p..

GODFREY, R. G. e FREDERICK, B. J. (1970), "Dispersion in Natural Streams", Professional Paper 433-k, U.S. Geological Survey.

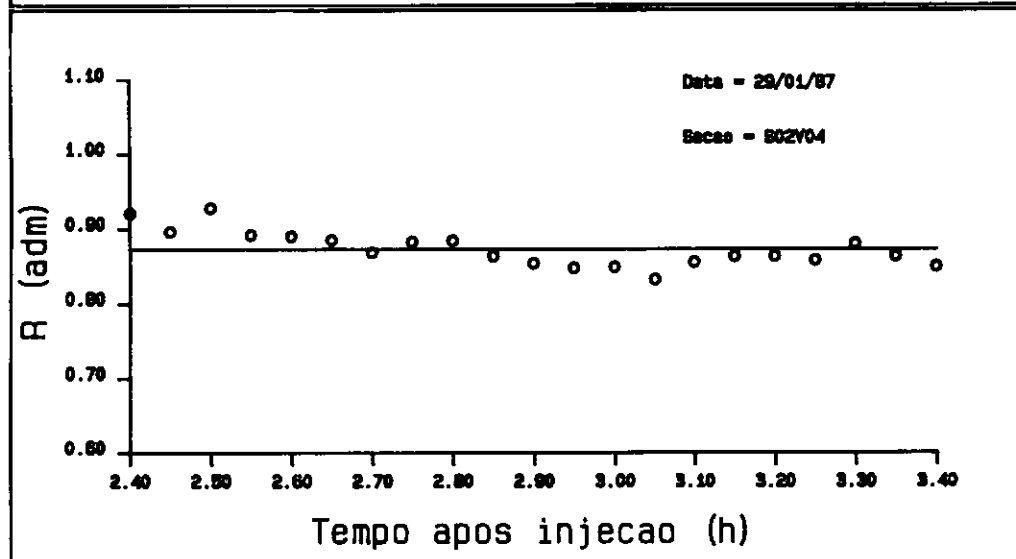
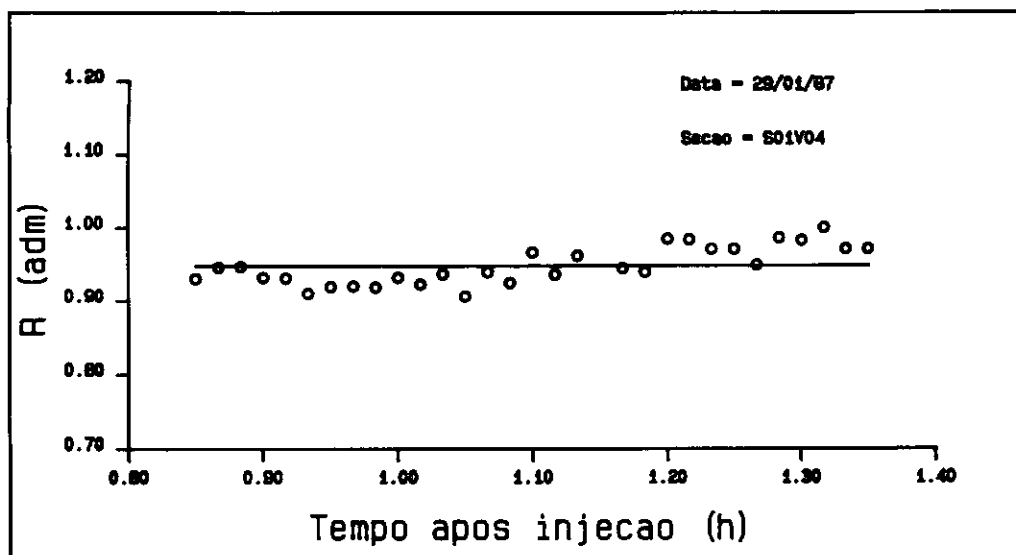
HOLLEY, E. R., JIRKA, G. W. (1986), "Mixing in Rivers", U.S. Corps of Engineers, Technical Report E-86-11, 419 p..

HOLLEY, E. R., SIEMONS, J., ABRAHAM, G. (1972). "Some Aspects of Analyzing Transverse Mixing in Rivers," J. Hydr. Research, Vol 10, No. 1, pp 27-57.

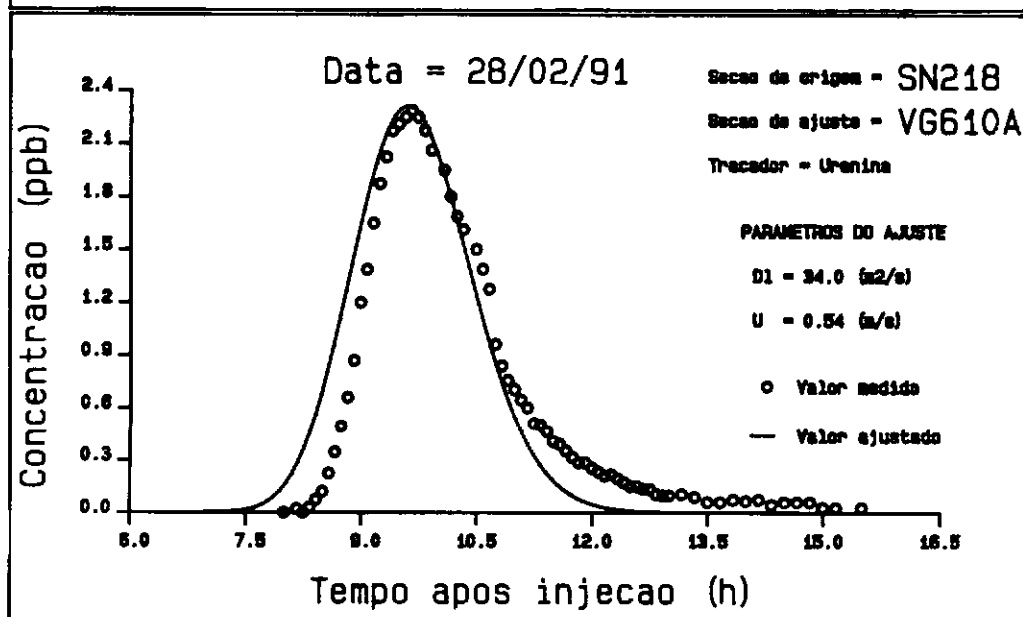
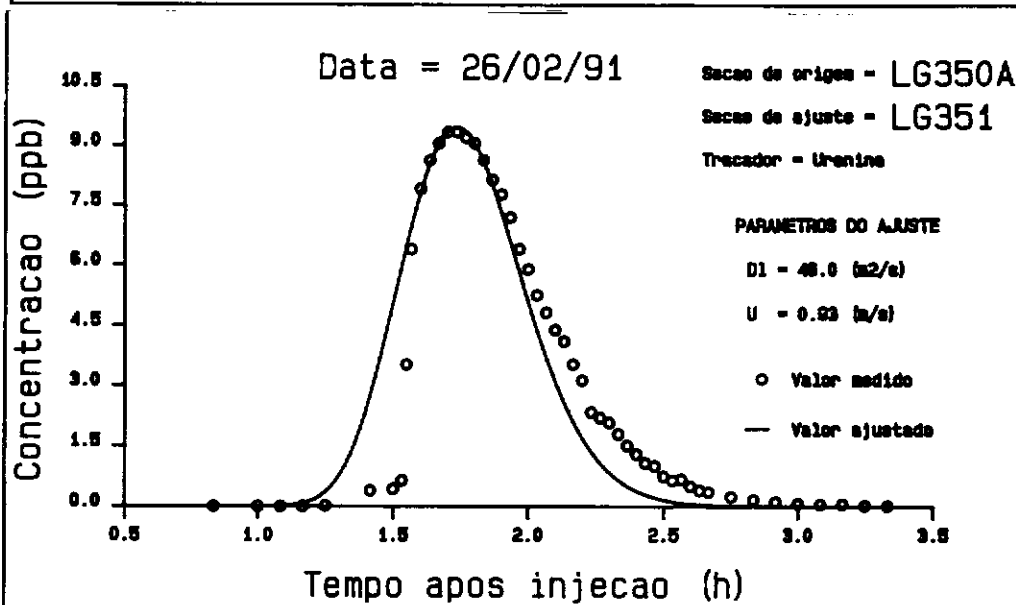
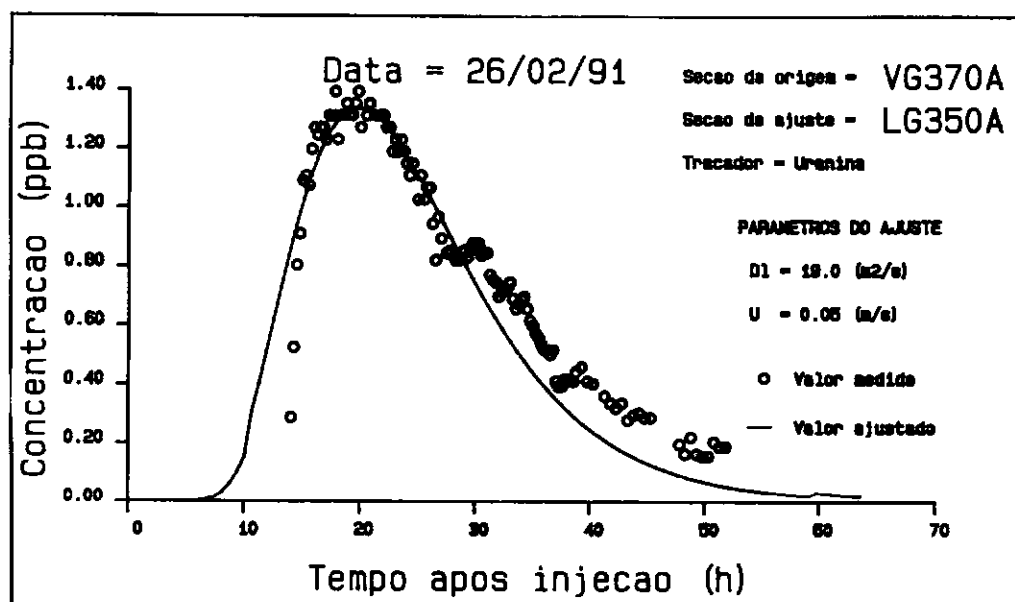
HUBBARD, E. F., KILPATRICK, F. A., MARTENS, L. A., WILSON JR., J. F. (1982), "Measurement of Time of Travel and Dispersion in Streams by Dye Tracing", Book 3, A9, U.S. Geological Survey, 44 p..

JAIN, S. C. (1976), "Longitudinal Dispersion Coefficients for Streams", Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, Vol. 102, No. EE2, pp.465-474.

LIU, H. (1977), "Predicting Dispersion Coefficient of Streams", Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. EE1, Proc. Paper 12724, pp. 59-69.



Gráficos de perda de Uranina nas seções S1 (vertical 04) e S2 (vertical 04) - ensaio de 29/01/87.



Ajuste das curvas de passagem de Uranina nos trechos VG370A - LG350A, LG350A - LG351, SN218 - VG610A pelo método de Convolução da Solução Analítica.

- MCQUIVEY, R. S., M. ASCE e KEEFER, T. N. (1974), "Simple Method for Predicting Dispersion in Streams", Journal of Environmental Engineering Division, ASCE, Vol. 100, No. EE4, pp. 997-1010.
- PETERSEN, F. B. (1977), "Prediction of Longitudinal Dispersion in Natural Streams", Paper n^o 14, Institute of Hydrodynamics, Tech.Univ., Denmark.
- ROLDÃO, J. S. F. (1988), "Determinação da Capacidade de Transporte e Dispersão do Rio Paraíba do Sul (RJ): Trecho Volta Redonda - Santa Cecília", Projeto COPPETEC ET-15296 - Relatórios Parciais No. 1, 2, 3, 4 e Relatório Final.
- ROLDÃO, J. S. F., SOARES, J. H. P. (1989), "Determinação "in situ" da Capacidade de Transporte e Dispersão do Rio Paraíba do Sul no trecho Volta Redonda - Barra do Piraí", IV Simpósio Luso-Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos, Lisboa, pp. 572-585.
- ROLDÃO, J. S. F. (1991), "Determinação "in situ" das Velocidades Médias de Trânsito e Coeficientes de dispersão entre Santa Cecília e E.T.A. do Guandú", Projeto COPPETEC ET-150422, Relatório Final, 25 p..
- ROLDÃO, J. S. F., SOARES, J. H. P., RIGO, D. (1991), "Desempenho de Traçadores Fluorescentes na Determinação de Coeficientes de Dispersão Longitudinal e Transversal no Rio Paraíba do Sul", V Simpósio Luso-Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos, Rio de Janeiro, pp. 171-182.

- SAYRE, W. W. e CHANG, F. M. (1968), "A Laboratory Investigation of the Open Channel Dispersion Process for Dissolved, Suspended, and Floating Dispersants", U. S. Geological Survey Professional Paper 433-E.
- TAYLOR, G. I. (1953), "Dispersion of Soluble Matter in Solvent Flowing through a Tube", Proc., Royal Society , A219, pp. 186-203.
- TAYLOR, G. I. (1954), "The Dispersion of Matter in Turbulent Flow Through a Pipe", Proc. Royal Society, A223, pp. 446-468.
- WILSON JR., J. F., COBB, E. D., KILPATRICK, F. A. (1986), "Fluorometric Procedures for Dye Tracing", Book 3, A12, U.S. Geological Survey, 34 p.
- YOTSUKURA, N., FISCHER, H. B. e SAYRE, W. W. (1970), "Measurements of Mixing Characteristics of the Missouri River Between Sioux City, Iowa, and Plattsmouth, Nebraska", U.S. Geological Survey Water Supply Paper No. 1899-G, U.S. Geological Survey, D. C., pp. 1-29.

APÊNDICE I

MEDIÇÕES DE VAZÃO EM VOLTA REDONDA E PINHEIRAL

Rio : Paraíba do Sul, RJ.

Seção : Volta Redonda

Fonte dos Dados : Medições da Light

Data da Medição : 15/02/78

Vazão : 351 [m³/s]

Velocidade Média : 0.83 [m/s]

Raio Hidráulico : 3.30 [m]

Área da Seção : 424.8 [m²]

Profundidade Média : 3.4 [m]

Largura da Seção : 126.6 [m]

Declividade da Linha d'água : 0.00030 [m/m]

K ($=\epsilon_y/\bar{u}u^*$) : 0.60

Numero de Faixas : 32

Largura (m)	Profundidade (m)	Velocidade Média (m/s)
1.00	0.90	0.254
1.00	1.55	0.358
2.00	2.27	0.476
6.00	3.18	0.674
8.00	3.69	0.835
8.00	3.82	0.891
8.00	3.89	0.898
8.00	3.76	0.909
8.00	3.72	0.958
8.00	3.59	0.964
8.00	3.64	0.913
8.00	3.61	0.905
8.00	3.28	0.933
8.00	3.10	0.900
8.00	3.31	0.847
8.00	3.51	0.827
4.00	3.69	0.778
3.00	3.79	0.681
1.00	3.92	0.595
1.00	3.77	0.504
1.00	3.67	0.305
1.00	3.61	0.081
1.00	3.50	0.000
1.00	2.53	0.000
1.00	2.10	0.000
1.00	1.69	0.000
1.00	0.80	0.000
1.00	0.70	0.000
1.00	0.50	0.000
1.00	0.30	0.000
0.60	0.15	0.000

Rio : Paraíba do Sul, RJ.

Seção : Volta Redonda

Fonte dos Dados : Medições da Light

Data da Medição : 20/02/86

Vazão : 293 [m³/s]

Velocidade Média : 0.75 [m/s]

Raio Hidráulico : 3.22 [m]

Área da Seção : 392.7 [m²]

Profundidade Média : 3.3 [m]

Largura da Seção : 120.0 [m]

Declividade da Linha d'água : 0.00030 [m/m]

K ($=\epsilon_y/\bar{du}^*$) : 0.60

Número de Faixas : 29

Largura (m)	Profundidade (m)	Velocidade Média (m/s)
3.00	0.00	0.103
3.00	2.60	0.220
3.00	3.56	0.401
3.00	3.75	0.634
3.00	3.60	0.737
3.00	3.76	0.756
3.00	4.01	0.808
3.00	3.99	0.817
3.00	3.80	0.807
3.00	3.61	0.802
5.00	3.72	0.834
5.00	3.75	0.844
5.00	3.81	0.845
5.00	3.57	0.909
5.00	3.55	0.938
5.00	3.52	0.932
5.00	3.73	0.945
5.00	3.55	0.913
5.00	3.35	0.848
5.00	3.08	0.818
5.00	3.00	0.812
5.00	2.97	0.804
5.00	3.27	0.790
5.00	3.35	0.748
5.00	3.45	0.679
5.00	3.56	0.366
3.00	3.63	0.046
3.00	1.86	0.000
4.00	0.62	0.000

Rio : Paraíba do Sul, RJ.

Seção : Volta Redonda

Fonte dos Dados : Medições da Light

Data da Medição : 15/06/83

Vazão : 678 [m³/s]

Velocidade Média : 1.17 [m/s]

Raio Hidráulico : 4.40 [m]

Área da Seção : 577.4 [m²]

Profundidade Média : 4.5 [m]

Largura da Seção : 128.3 [m]

Declividade da Linha d'água : 0.00030 [m/m]

K (=c_y/du*) : 0.60

Número de Faixas : 28

Largura (m)	Profundidade (m)	Velocidade Média (m/s)
3.00	1.02	0.470
3.00	3.44	0.629
6.00	4.85	0.877
6.00	5.13	1.126
6.00	5.21	1.159
6.00	5.62	1.120
6.00	5.17	1.126
6.00	5.11	1.207
6.00	5.15	1.272
6.00	5.26	1.275
6.00	5.30	1.353
6.00	5.12	1.393
6.00	5.25	1.402
6.00	4.92	1.370
5.00	4.72	1.310
5.00	4.63	1.311
5.00	4.78	1.379
5.00	4.92	1.410
5.00	5.02	1.340
3.00	5.24	1.186
3.00	5.32	0.982
3.00	5.14	0.776
3.00	3.93	0.332
3.00	1.20	0.000
3.00	1.12	0.000
3.00	1.18	0.000
1.30	0.64	0.000

Rio : Paraíba do Sul, RJ.

Seção : Pinheiral

Fonte dos Dados : Medições da Light

Data da Medição : 03/11/71

Vazão : 277 [m³/s]

Velocidade Média : 0.76 [m/s]

Raio Hidráulico : 2.30 [m]

Área da Seção : 365.6 [m²]

Profundidade Média : 2.4 [m]

Largura da Seção : 153.7 [m]

Declividade da Linha d'água : 0.00030 [m/m]

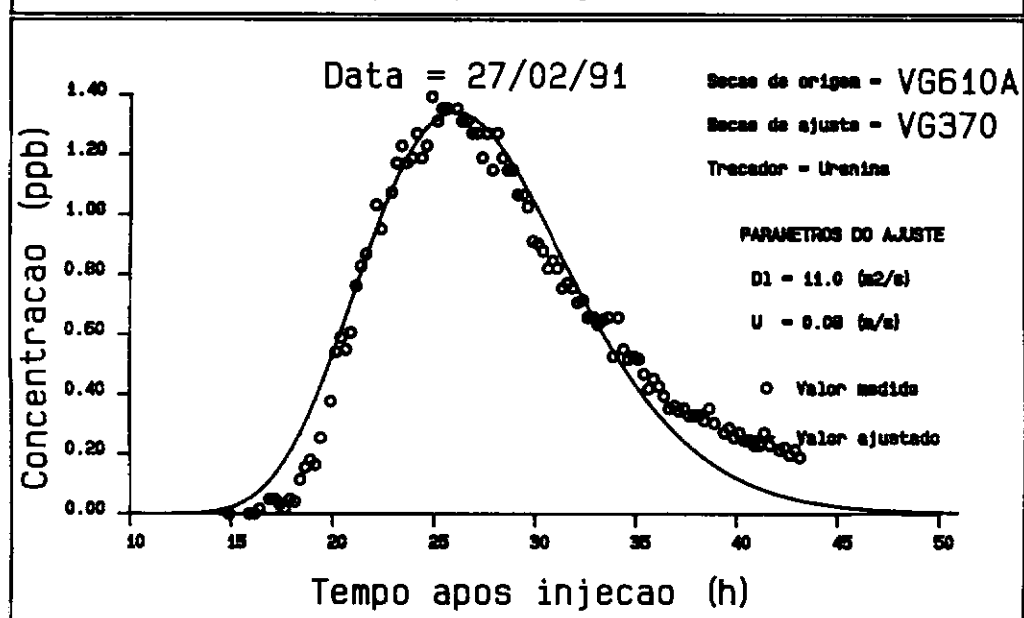
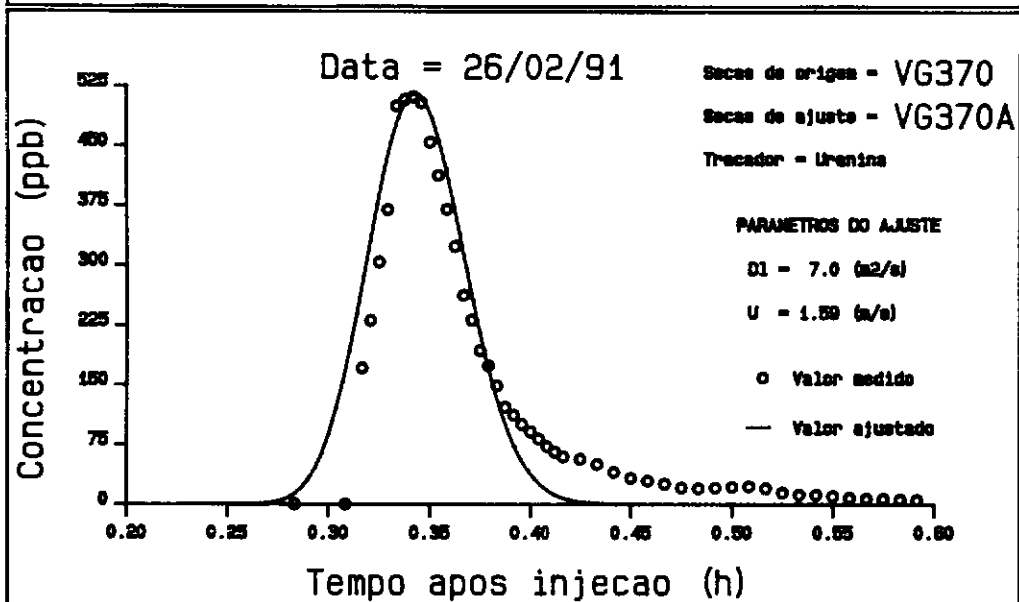
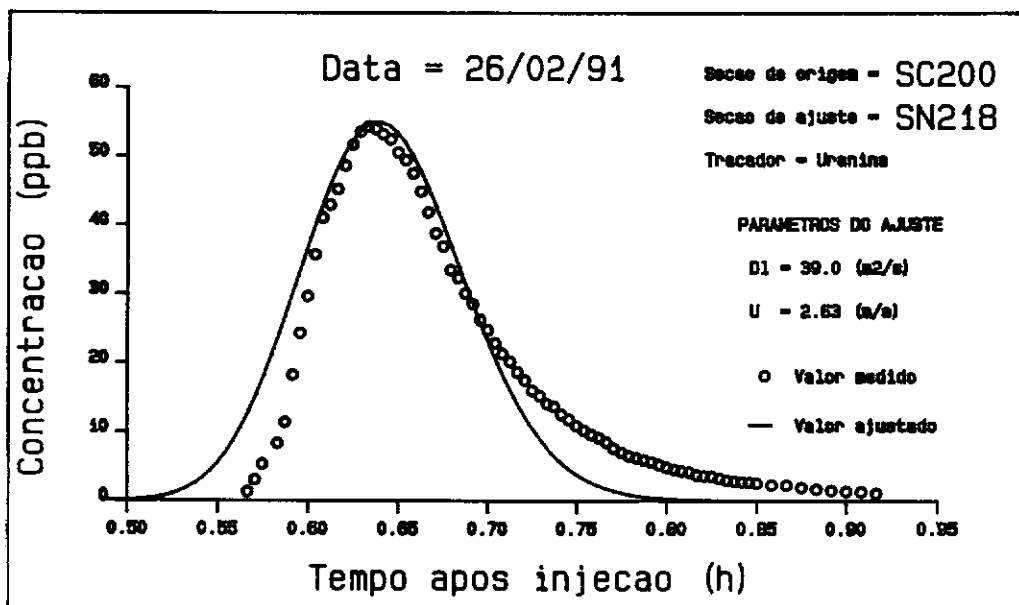
K ($=\epsilon_y/\bar{du}^*$) : 0.60

Número de Faixas : 39

Largura (m)	Profundidade (m)	Velocidade Média (m/s)
0.00	0.00	0.000
0.20	0.18	0.000
1.00	0.32	0.000
1.00	0.53	0.000
1.00	0.60	0.000
1.00	0.81	0.000
1.00	1.22	0.000
1.00	1.58	0.284
4.00	1.84	0.542
5.00	2.09	0.626
5.00	2.28	0.709
5.00	2.36	0.745
5.00	2.40	0.781
5.00	2.45	0.804
5.00	2.40	0.826
5.00	2.47	0.893
5.00	2.42	0.959
5.00	2.46	0.967
5.00	2.46	0.974
5.00	2.51	1.003
5.00	2.59	1.032
5.00	2.63	1.000
5.00	2.86	0.968
5.00	2.84	0.915
5.00	2.96	0.862
5.00	3.08	0.877
5.00	3.16	0.891
5.00	3.13	0.796
5.00	3.22	0.700
5.00	2.81	0.690
5.00	2.30	0.680
5.00	2.16	0.668
5.00	1.97	0.655
5.00	2.15	0.523
5.00	2.49	0.391
5.00	2.21	0.109
5.00	1.20	0.032
2.00	0.68	0.000
1.00	0.39	0.000

APÊNDICE II

AJUSTES DE CURVAS DE PASSAGEM DE URANINA PARA
DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DISPERSÃO LONGITUDINAL



Ajuste das curvas de passagem de Uranina nos trechos SC200 - SN218, VG370 - VG370A e VG610A - VG370 pelo método de Convolução da Solução Analítica.

Rio : Paraíba do Sul, RJ.

Seção : Pinheiral

Fonte dos Dados : Medições da Light

Data da medição : 18/12/73

Vazão : 479 [m³/s]

Velocidade Média : 1.02 [m/s]

Raio Hidráulico : 3.00 [m]

Área da Seção : 470.3 [m²]

Profundidade Média : 3.0 [m]

Largura da Seção : 155.5 [m]

Declividade da Linha d'água : 0.00030 [m/m]

K ($=\varepsilon_y/\bar{du}^*$) : 0.60

Número de Faixas : 43

Largura (m)	Profundidade (m)	Velocidade Média (m/s)
0.00	0.00	0.000
1.00	0.10	0.000
1.00	0.30	0.000
1.00	0.40	0.000
1.00	0.50	0.000
1.00	0.80	0.000
1.00	1.00	0.000
1.00	2.00	0.234
2.00	2.48	0.393
5.00	2.72	0.757
5.00	3.00	0.974
5.00	3.00	1.012
5.00	3.18	1.050
5.00	3.21	1.028
5.00	3.21	1.005
5.00	3.25	1.042
5.00	3.25	1.079
5.00	3.20	1.123
5.00	3.21	1.167
5.00	3.18	1.201
5.00	3.30	1.234
5.00	3.66	1.167
5.00	3.62	1.099
5.00	3.72	1.160
5.00	3.93	1.221
5.00	3.72	1.147
5.00	4.13	1.072
5.00	3.98	1.006
5.00	4.13	0.940
5.00	3.65	1.009
5.00	3.17	1.078
5.00	2.52	1.123
5.00	2.58	1.168
5.00	2.44	1.029
5.00	2.46	0.889
5.00	2.40	0.979
5.00	2.70	0.536
2.00	2.01	0.100
1.00	1.70	0.027
1.00	1.28	0.000
1.00	0.65	0.000
1.00	0.40	0.000
0.50	0.20	0.000

Rio : Paraíba do Sul, RJ.

Seção : Pinheiral

Fonte dos Dados : Medições da Light

Data da Medição : 25/11/72

Vazão : 342 [m³/s]

Velocidade Média : 0.90 [m/s]

Raio Hidráulico : 2.40 [m]

Área da Seção : 380.6 [m²]

Profundidade Média : 2.5 [m]

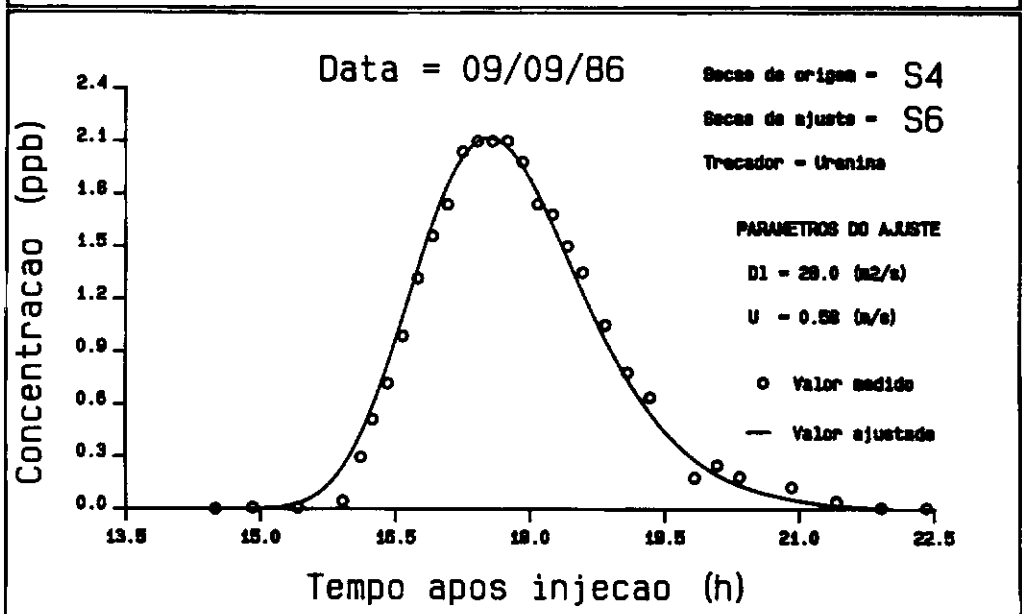
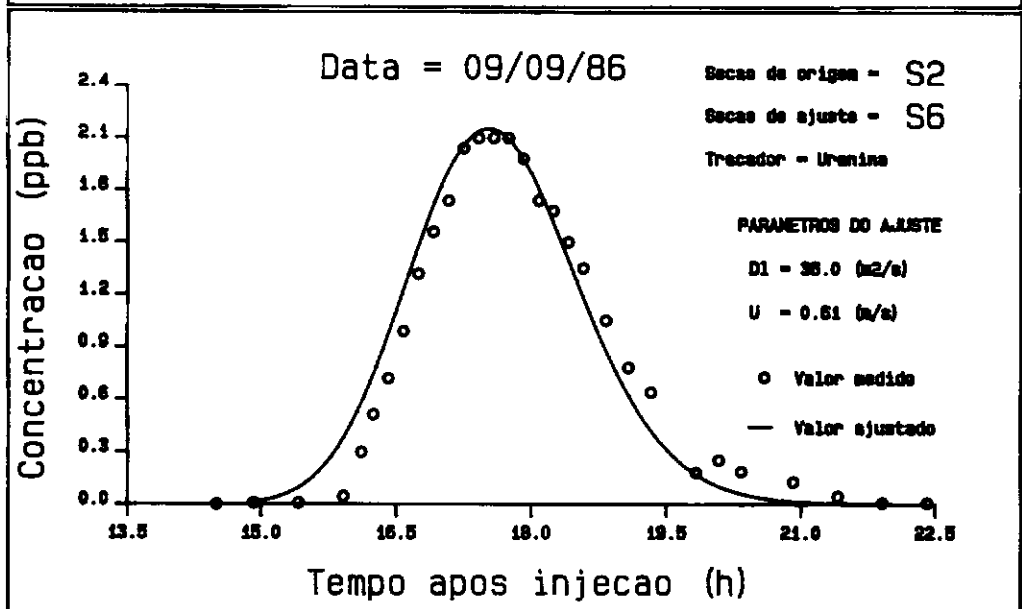
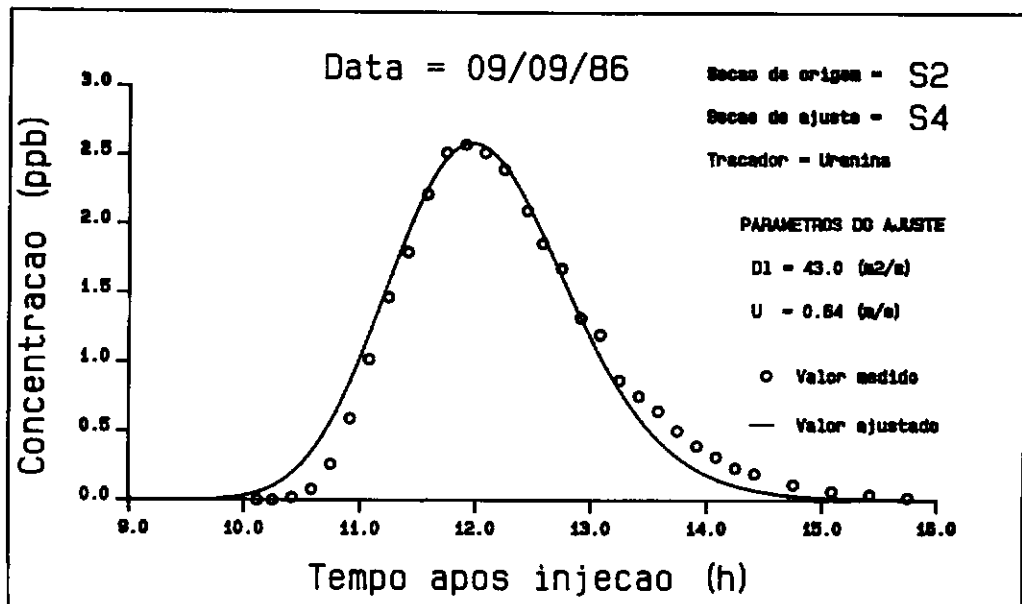
Largura da Seção : 153.0 [m]

Declividade da Linha d'água : 0.00030 [m/m]

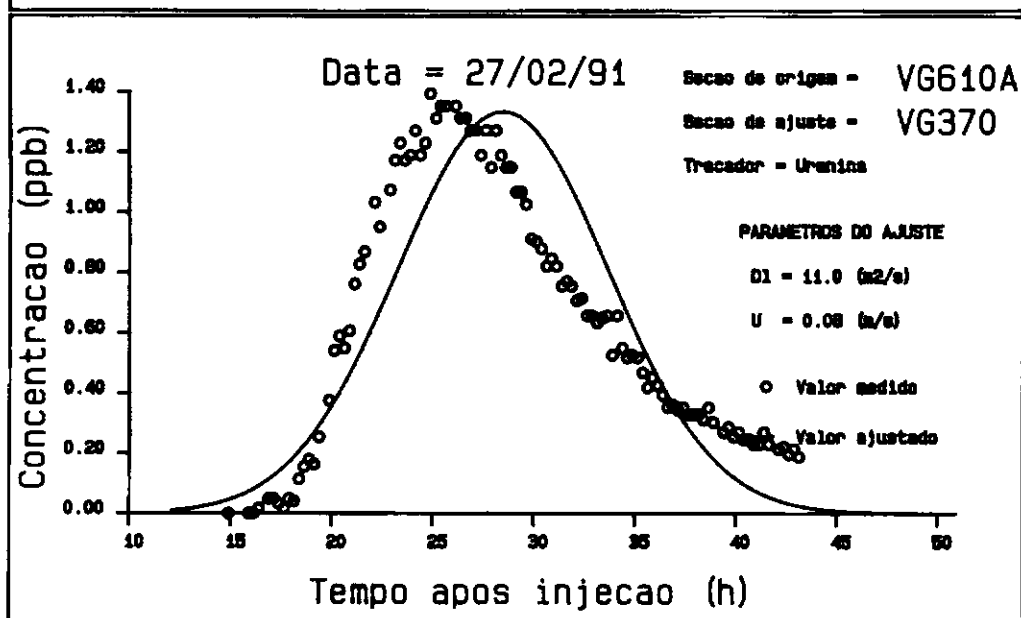
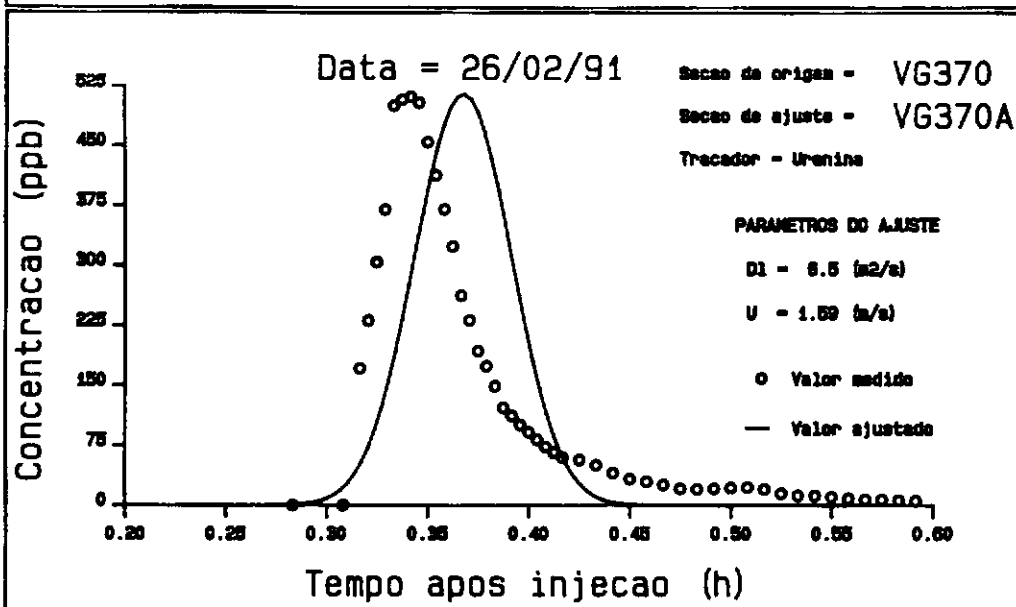
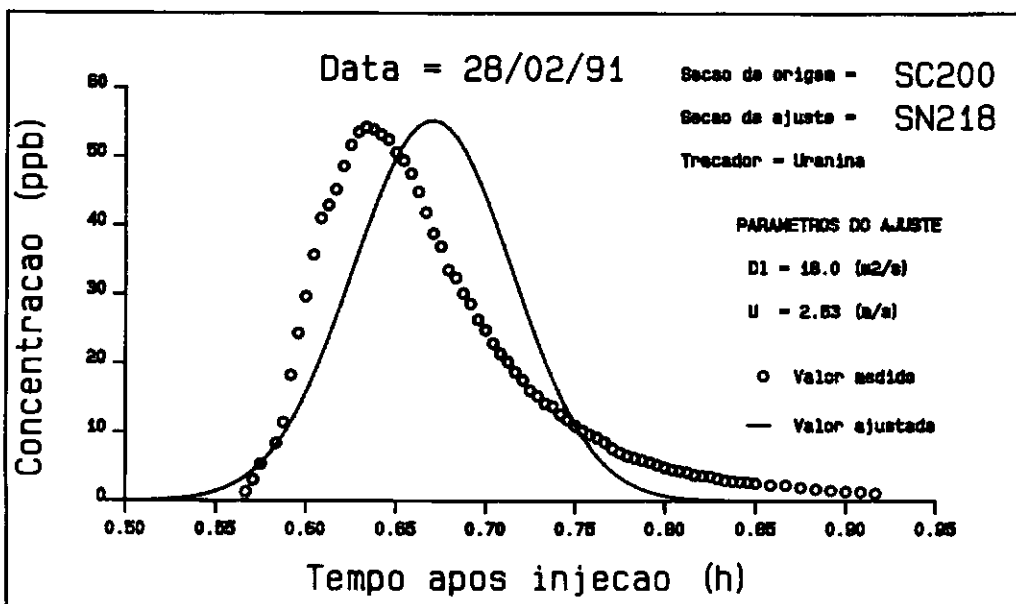
K ($=\epsilon_y/\bar{du}^*$) : 0.60

Número de Faixas : 43

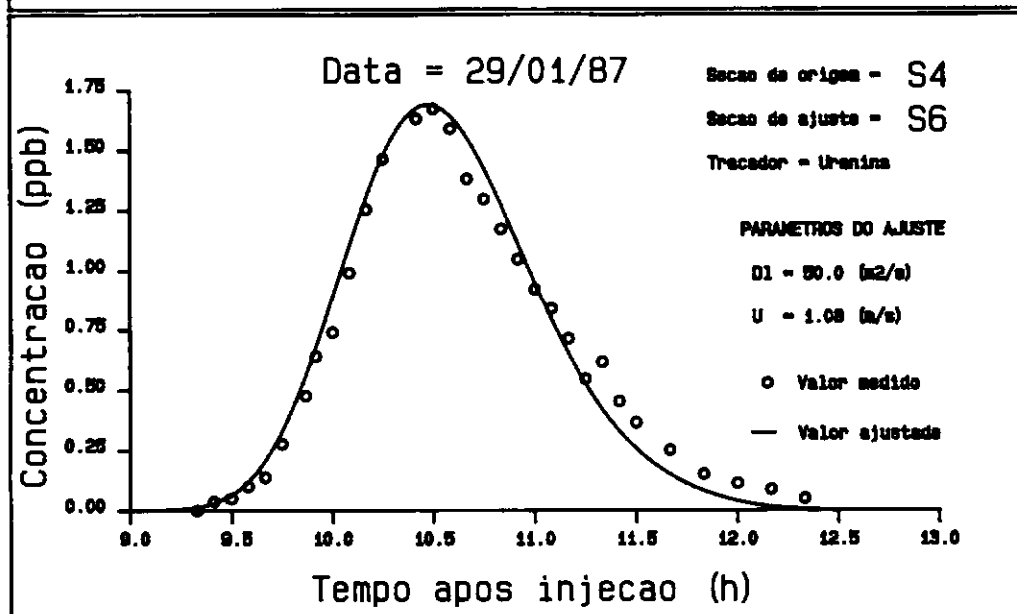
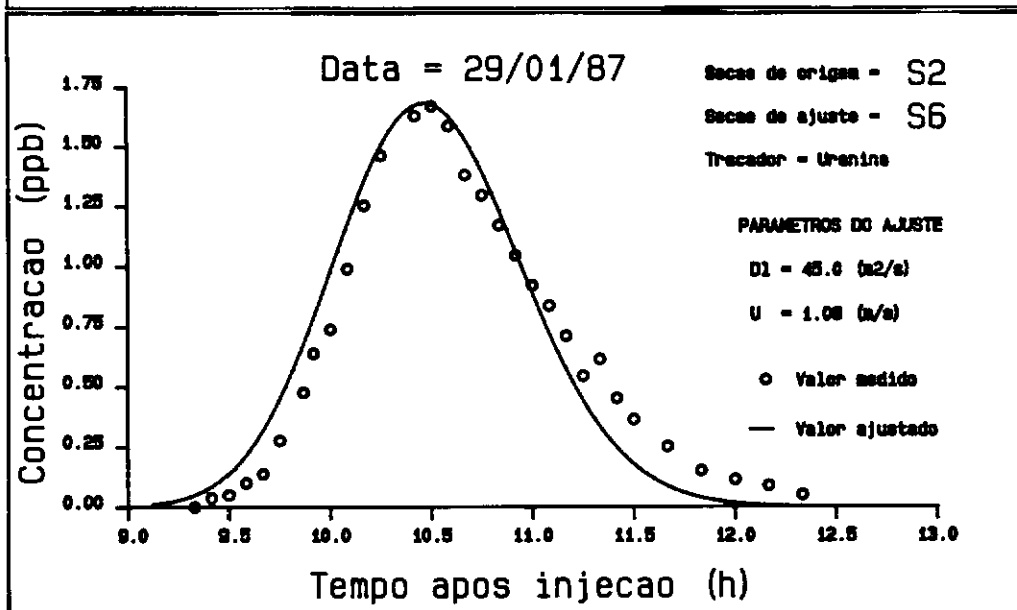
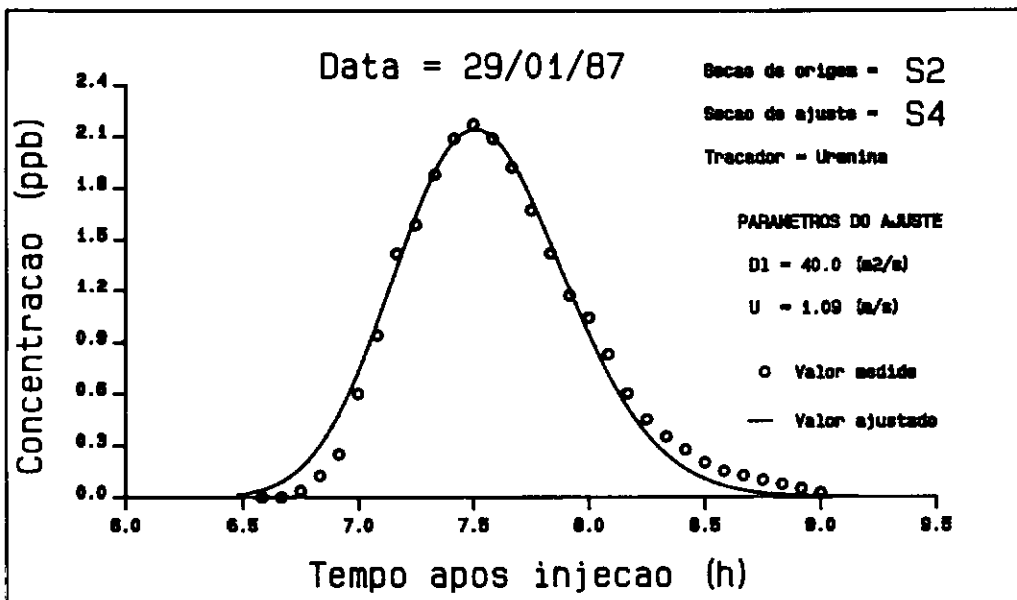
Largura (m)	Profundidade (m)	Velocidade Média (m/s)
0.00	0.00	0.000
1.00	0.20	0.000
1.00	0.25	0.000
1.00	0.40	0.000
1.00	0.80	0.000
1.00	1.02	0.307
1.00	1.32	0.510
2.00	1.75	0.598
2.00	1.86	0.677
5.00	2.13	0.760
5.00	2.40	0.843
5.00	2.55	0.870
5.00	2.60	0.897
5.00	2.55	0.903
5.00	2.50	0.909
5.00	2.60	0.970
5.00	2.60	1.031
5.00	2.44	1.074
5.00	2.60	1.117
5.00	2.64	1.160
5.00	2.70	1.203
5.00	2.80	1.152
5.00	3.00	1.101
5.00	3.00	1.088
5.00	3.10	1.075
5.00	3.21	1.021
5.00	3.30	0.966
5.00	3.10	0.909
5.00	3.39	0.852
5.00	2.98	0.799
5.00	2.29	0.745
5.00	2.18	0.792
5.00	2.00	0.838
5.00	2.10	0.743
5.00	2.50	0.647
5.00	2.49	0.512
2.00	2.37	0.305
1.00	2.30	0.057
1.00	1.79	0.000
1.00	1.40	0.000
1.00	0.99	0.000
1.00	0.85	0.000
1.00	0.10	0.000



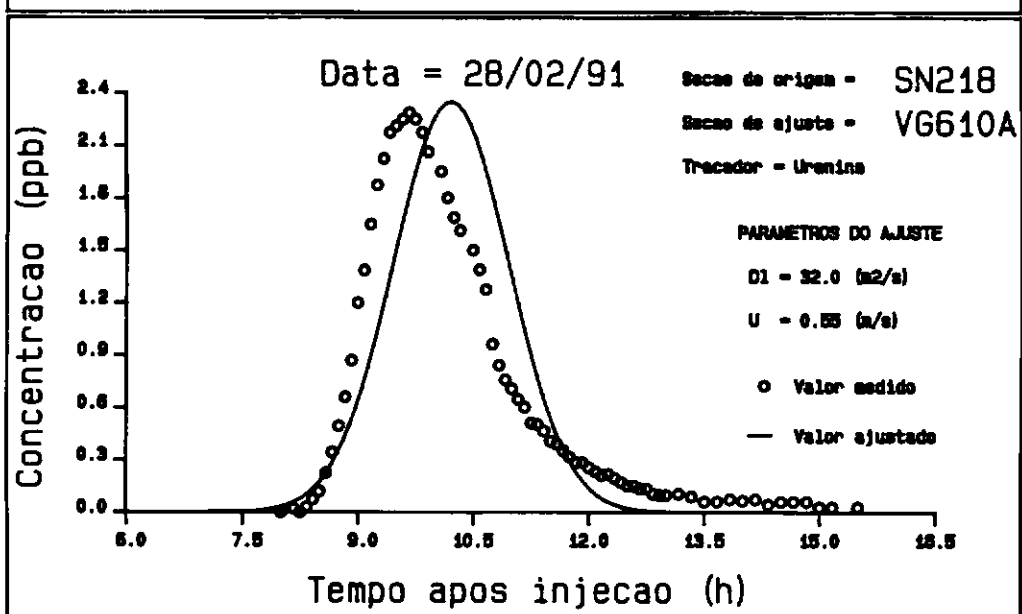
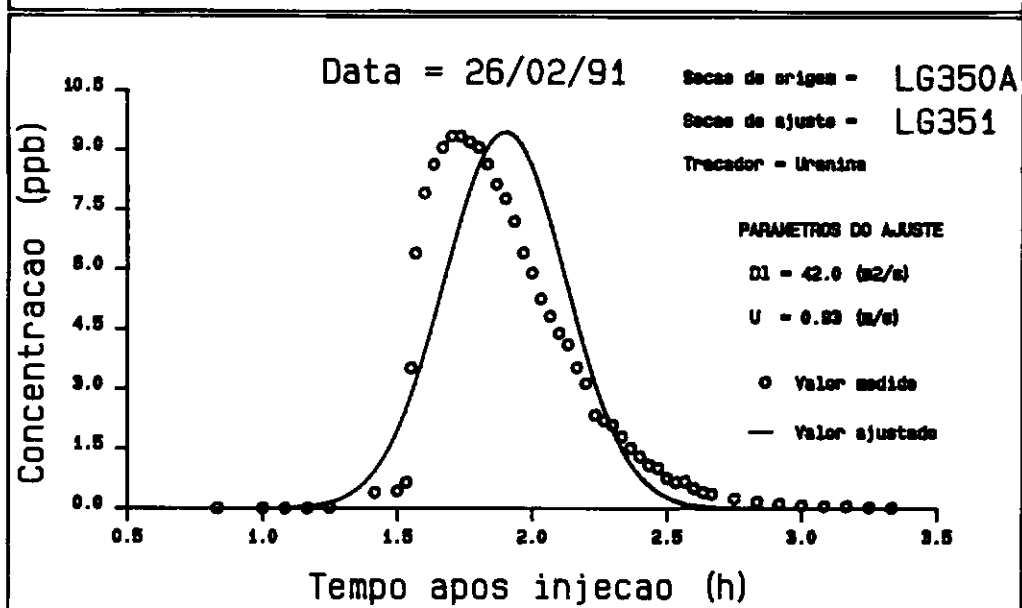
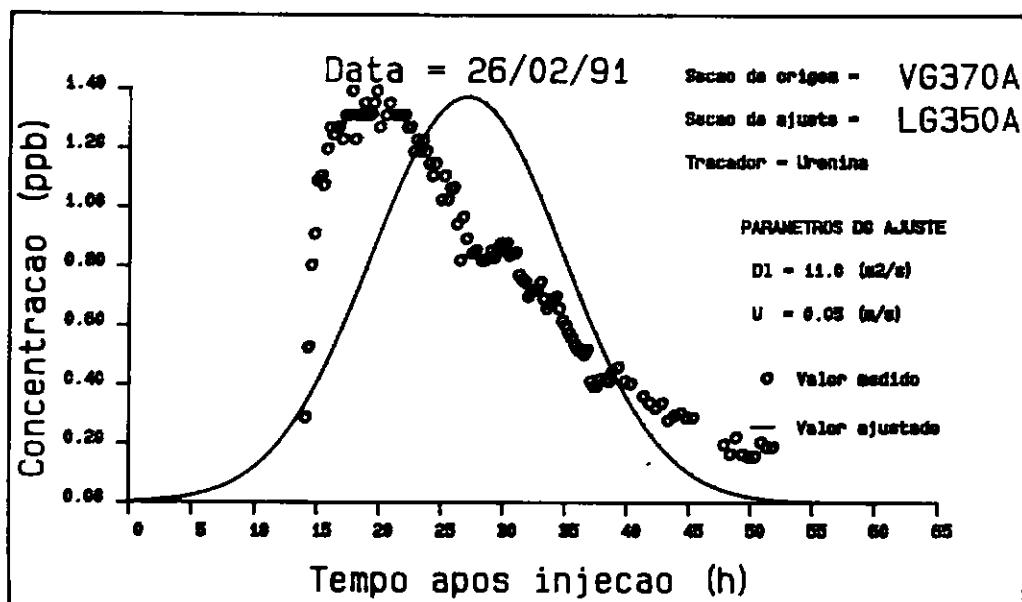
Ajuste das curvas de passagem de Ureia nos trechos S2 - S4, S2 - S6, S4 - S6 pelo método de Convolução da Solução Analítica - ensaio de 09/09/86.



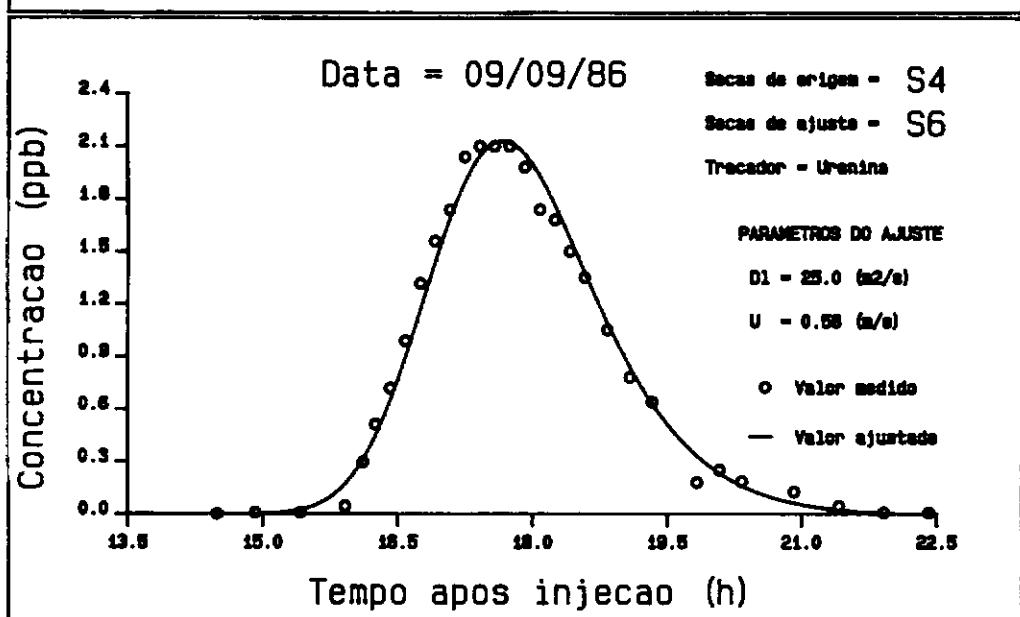
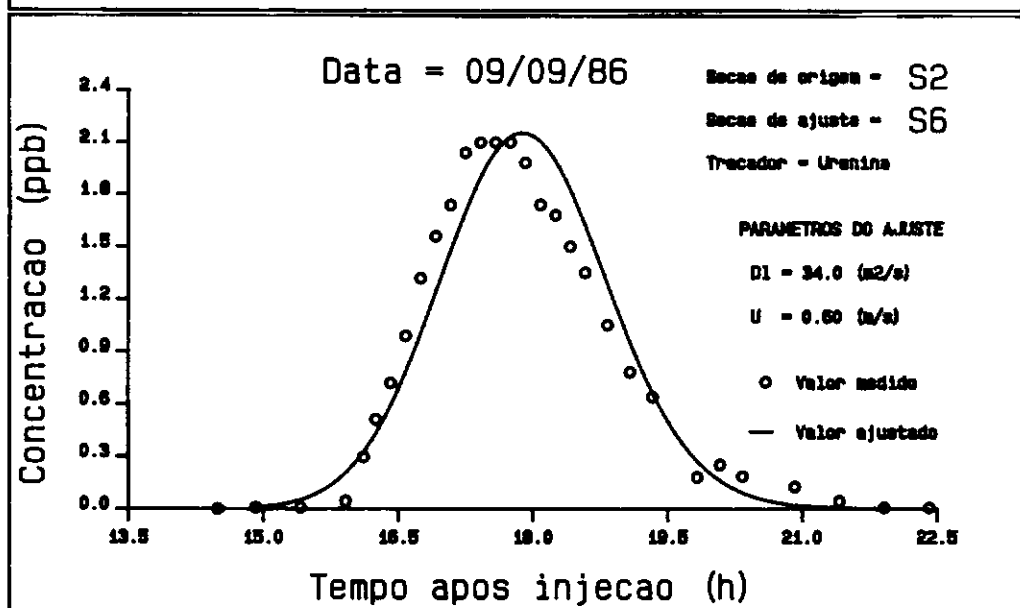
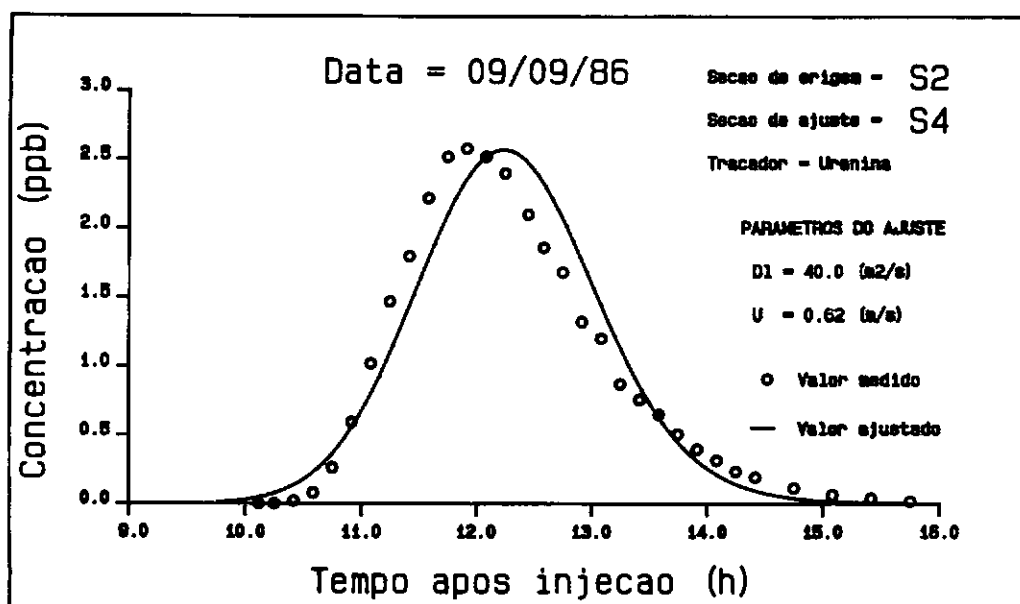
Ajuste das curvas de passagem de Ureanina nos trechos SC200 - SN218, VG370 - VG370A e VG610A - VG370 pelo método de Propagação de Fischer.



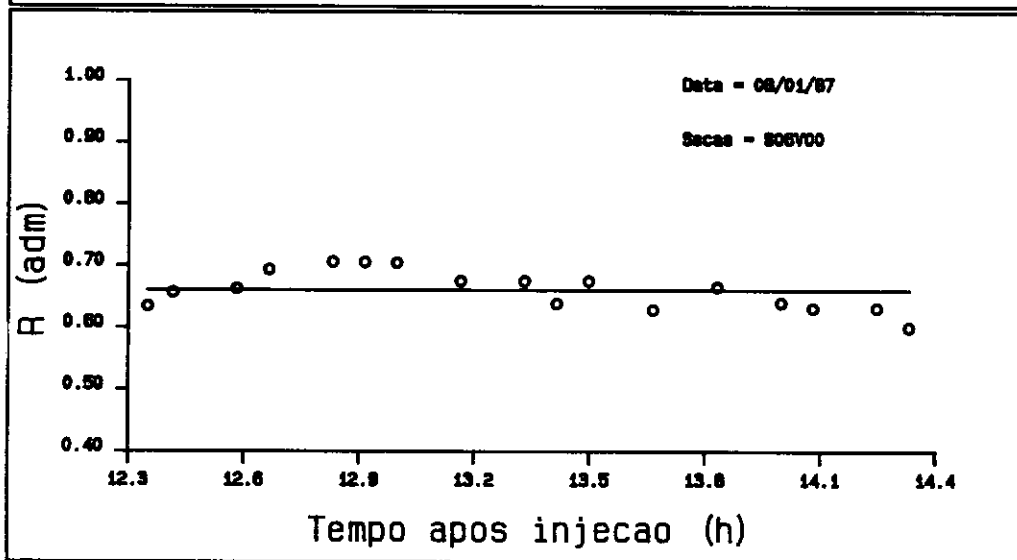
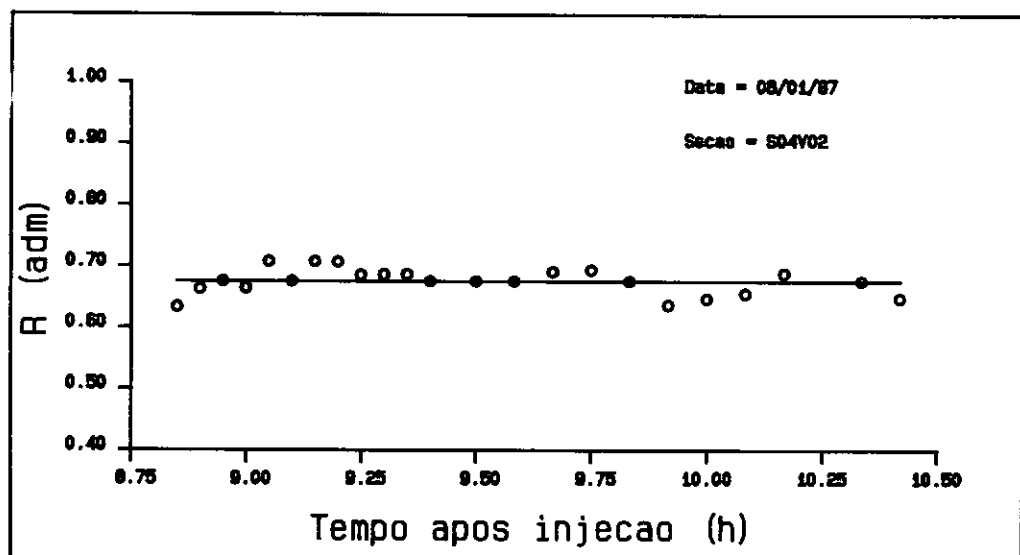
Ajuste das curvas de passagem de Uranina nos trechos S2 - S4, S2 - S6, S4 - S6 pelo método de Convolução da Solução Analítica - ensaio de 29/01/87.



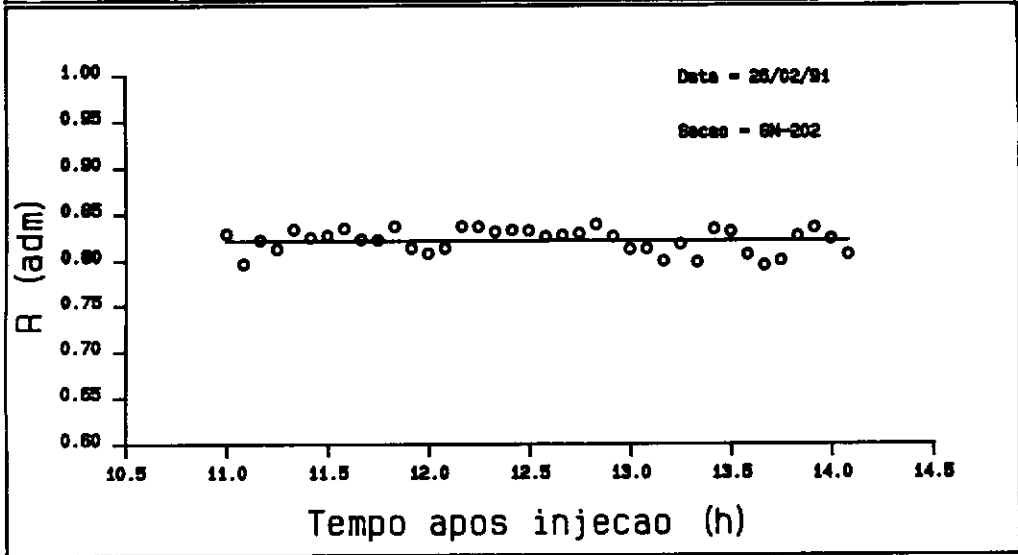
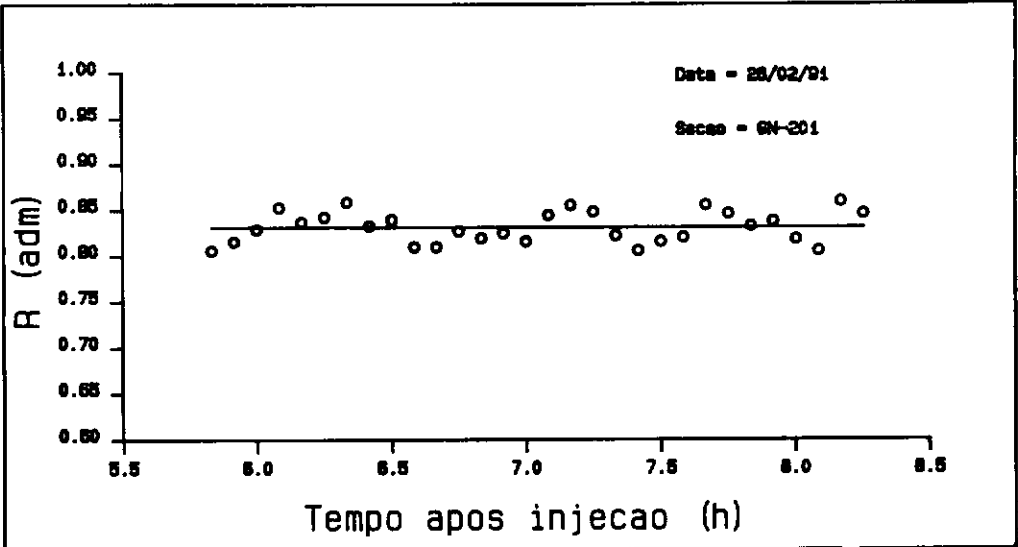
Ajuste das curvas de passagem de Ureia nos trechos VG370A - LG350A, LG350A - LG351, SN218 - VG610A pelo método de Propagação de Fischer.



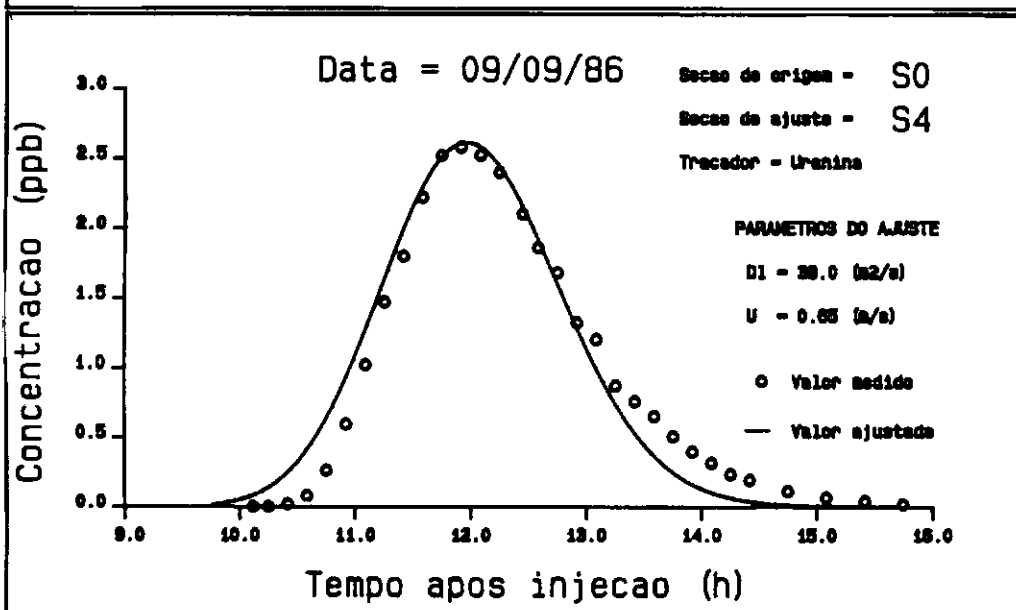
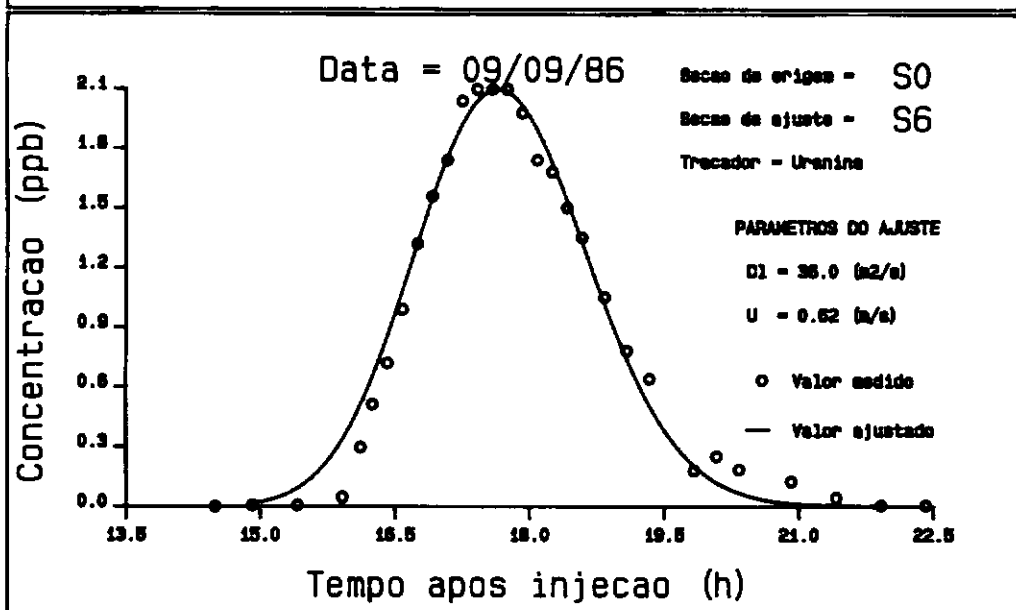
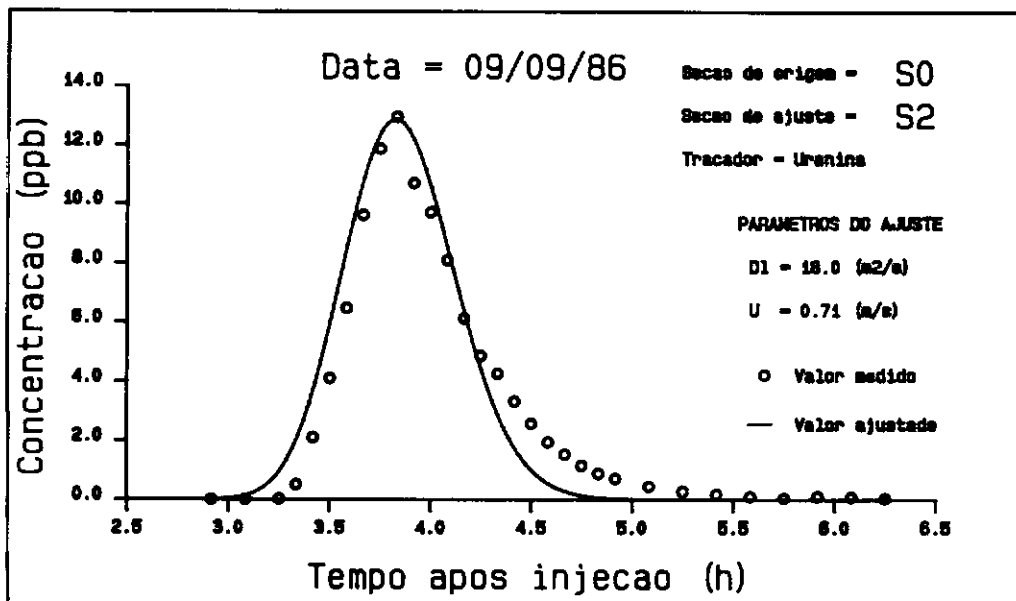
Ajuste das curvas de passagem de Uranina nos trechos S2 - S4, S2 - S6, S4 - S6 pelo método de Propagação de Fischer - ensaio de 09/09/86.



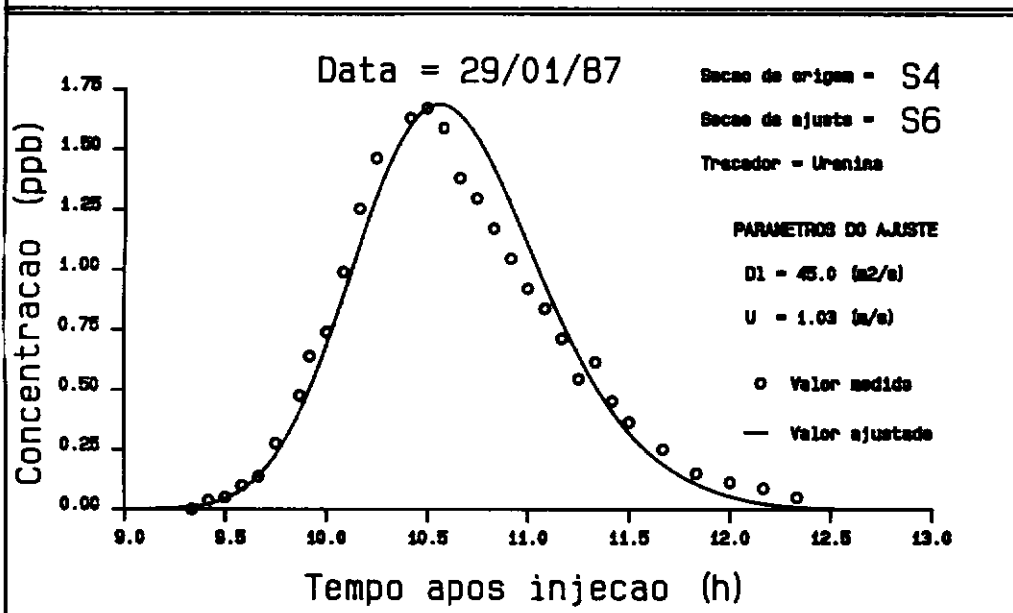
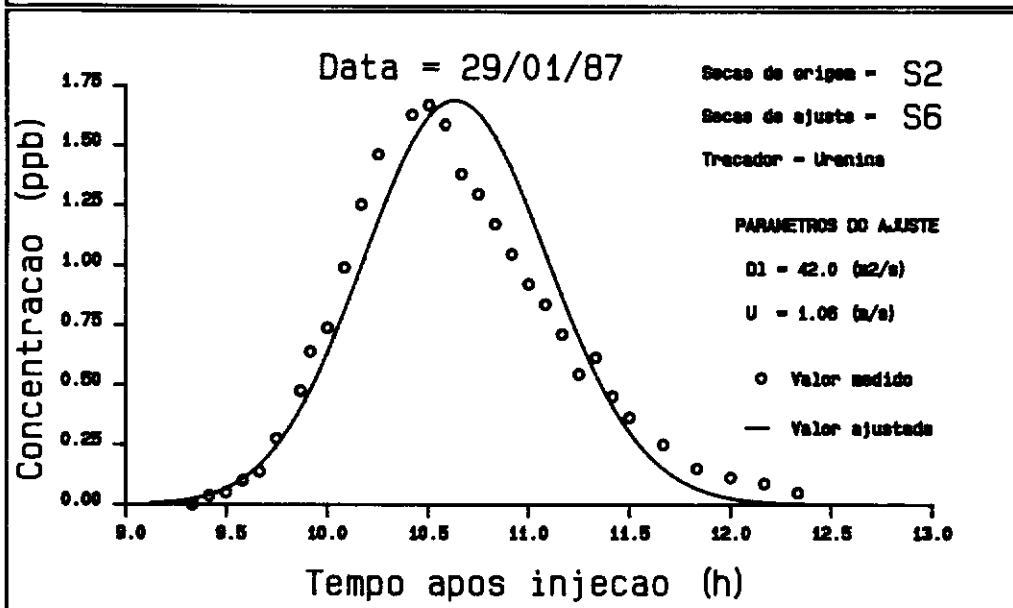
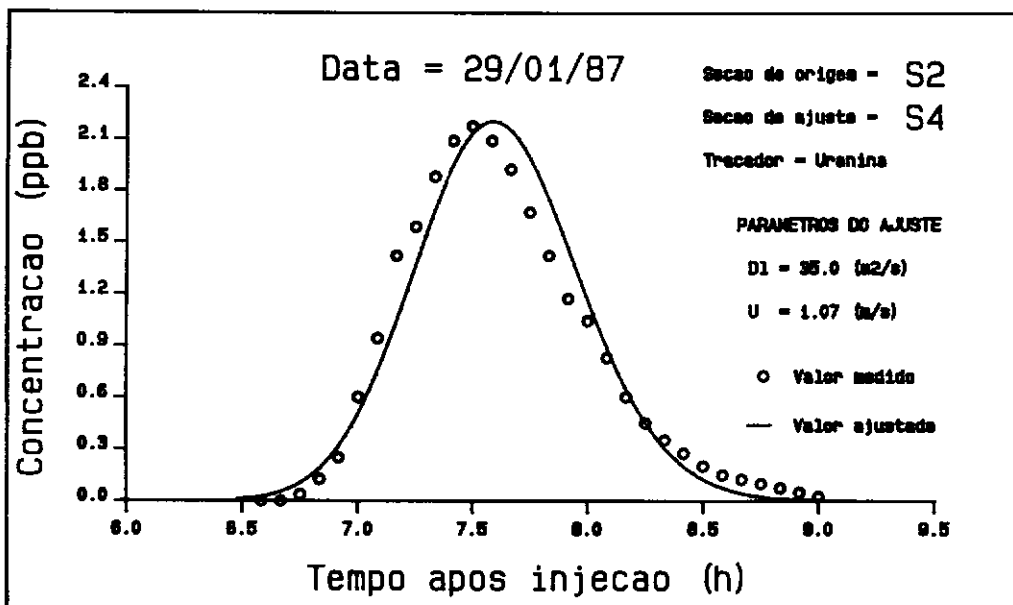
Gráficos de perda de Uranina nas seções S4 (vertical 02) e S6 (vertical única) - ensaio de 08/01/87.



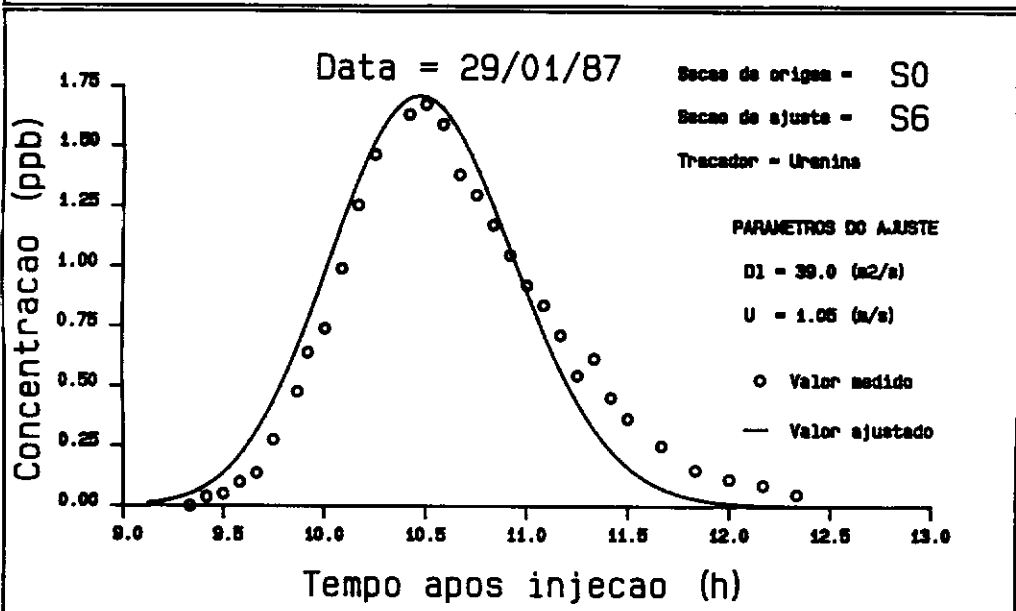
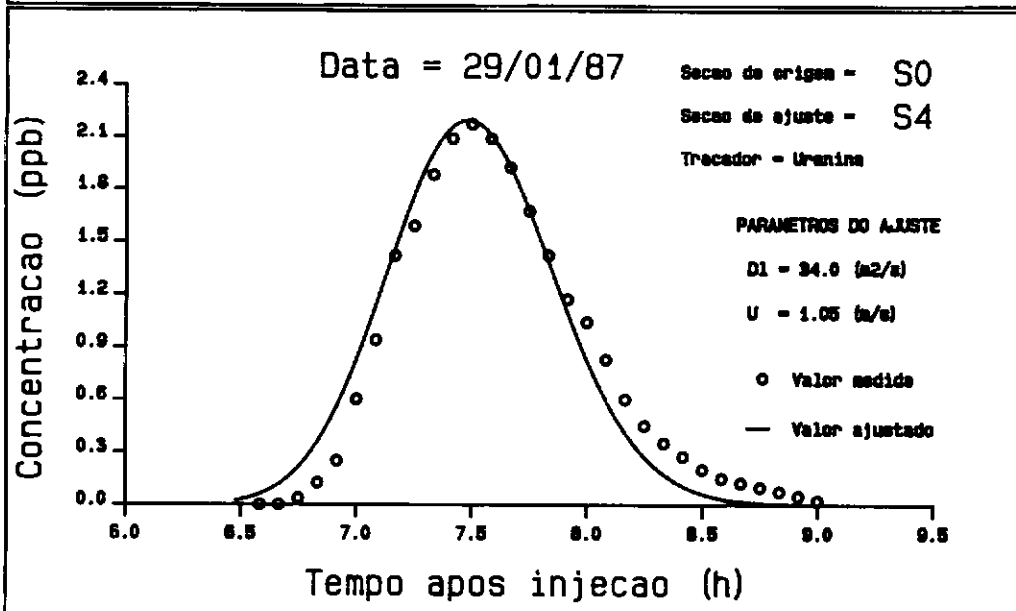
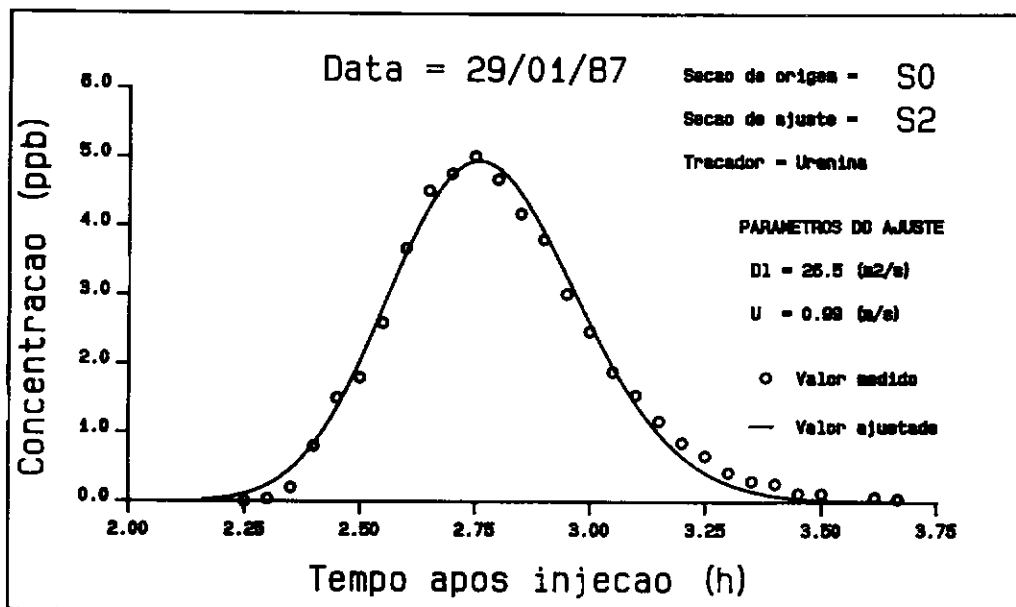
Gráficos de perda de Uranina nas seções GN201 E GN202 - ensaio de 26/02/91.



Ajuste das curvas de passagem de Urânina nos trechos S0 - S2, S0 - S4, S0 - S6 pelo método de Convolução da Solução Analítica - ensaio de 09/09/86.



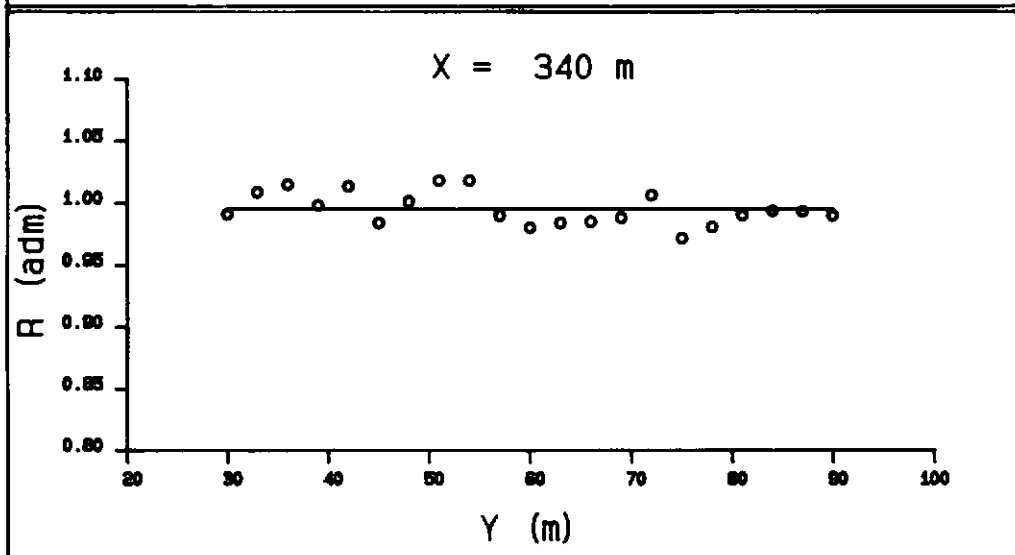
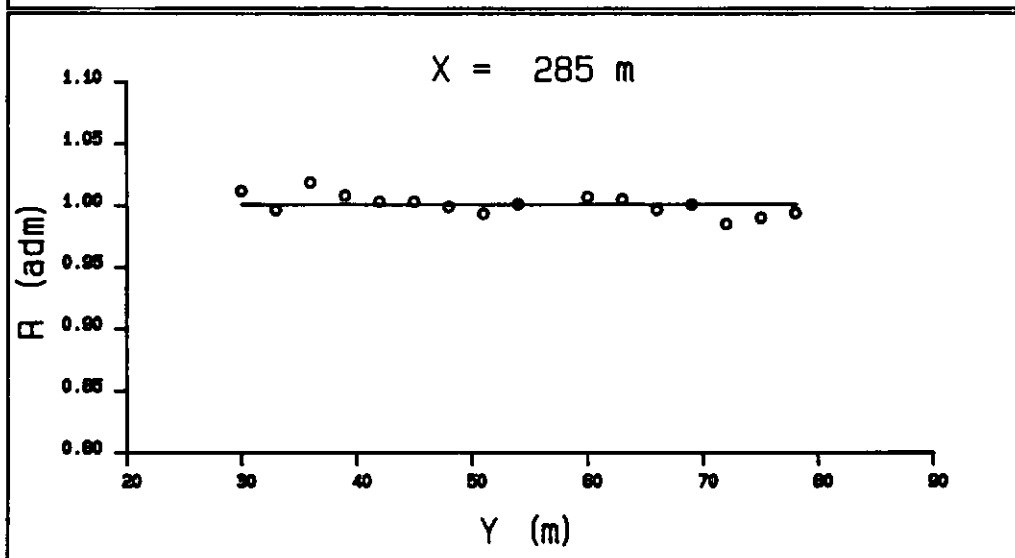
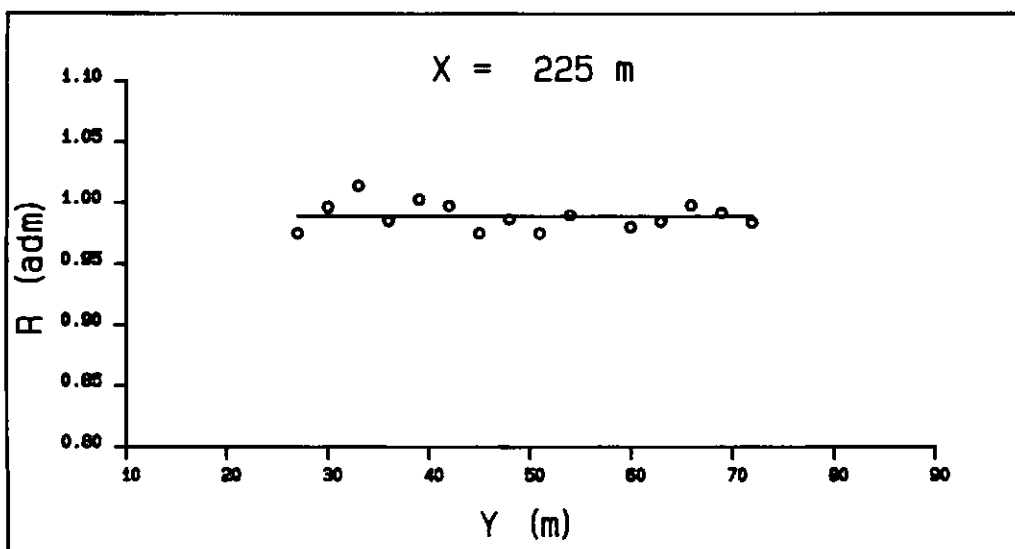
Ajuste das curvas de passagem de Uranina nos trechos S2 - S4, S2 - S6, S4 - S6 pelo método de Propagação de Fischer - ensaio de 29/01/87.



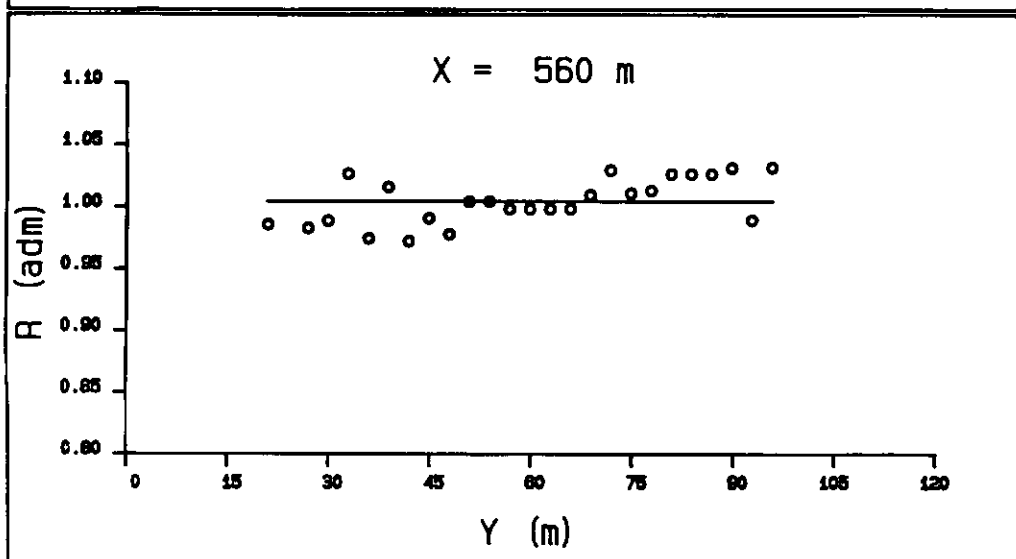
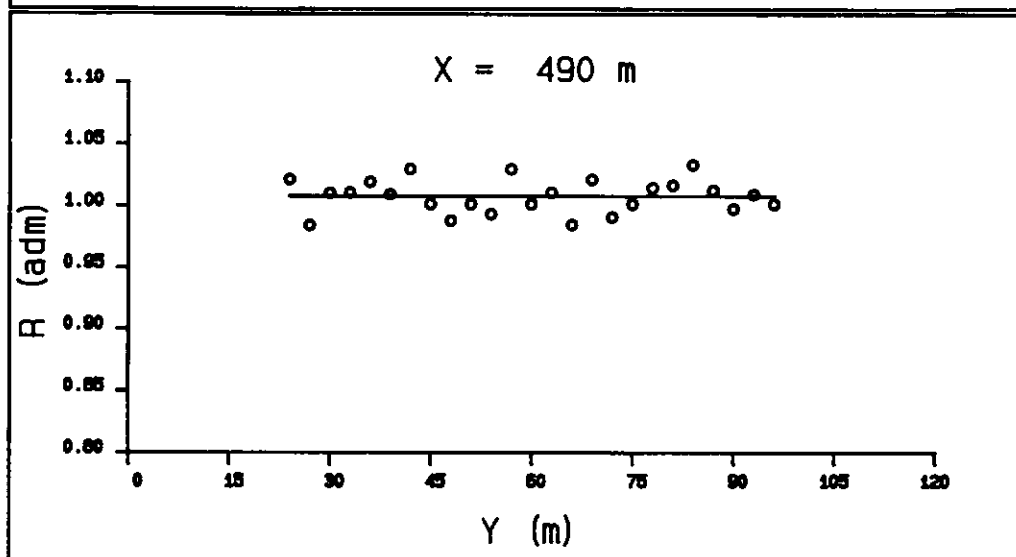
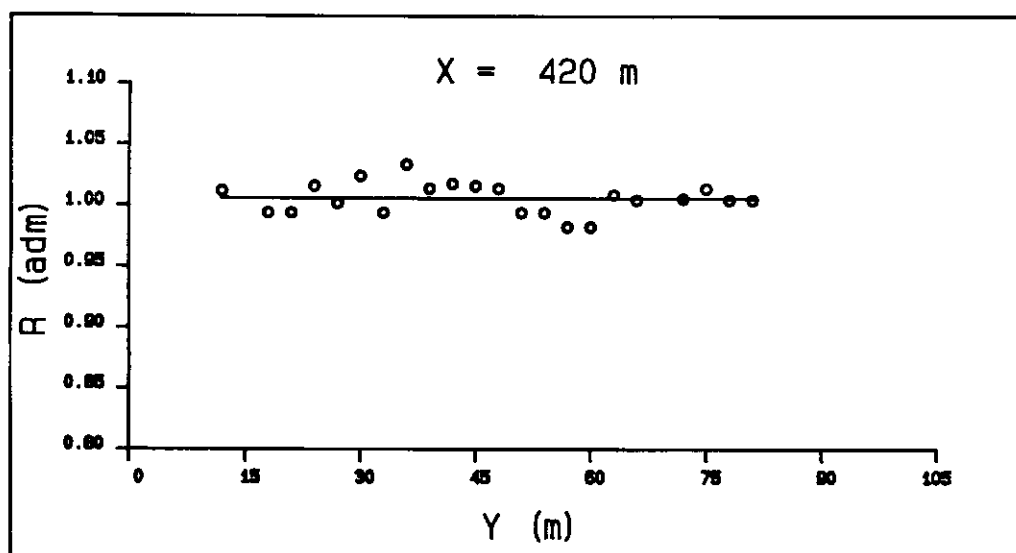
Ajuste das curvas de passagem de Uremina nos trechos S0 - S2, S0 - S4, S0 - S6 pelo método de Convolução da Solução Analítica - ensaio de 29/01/87.

APÊNDICE III

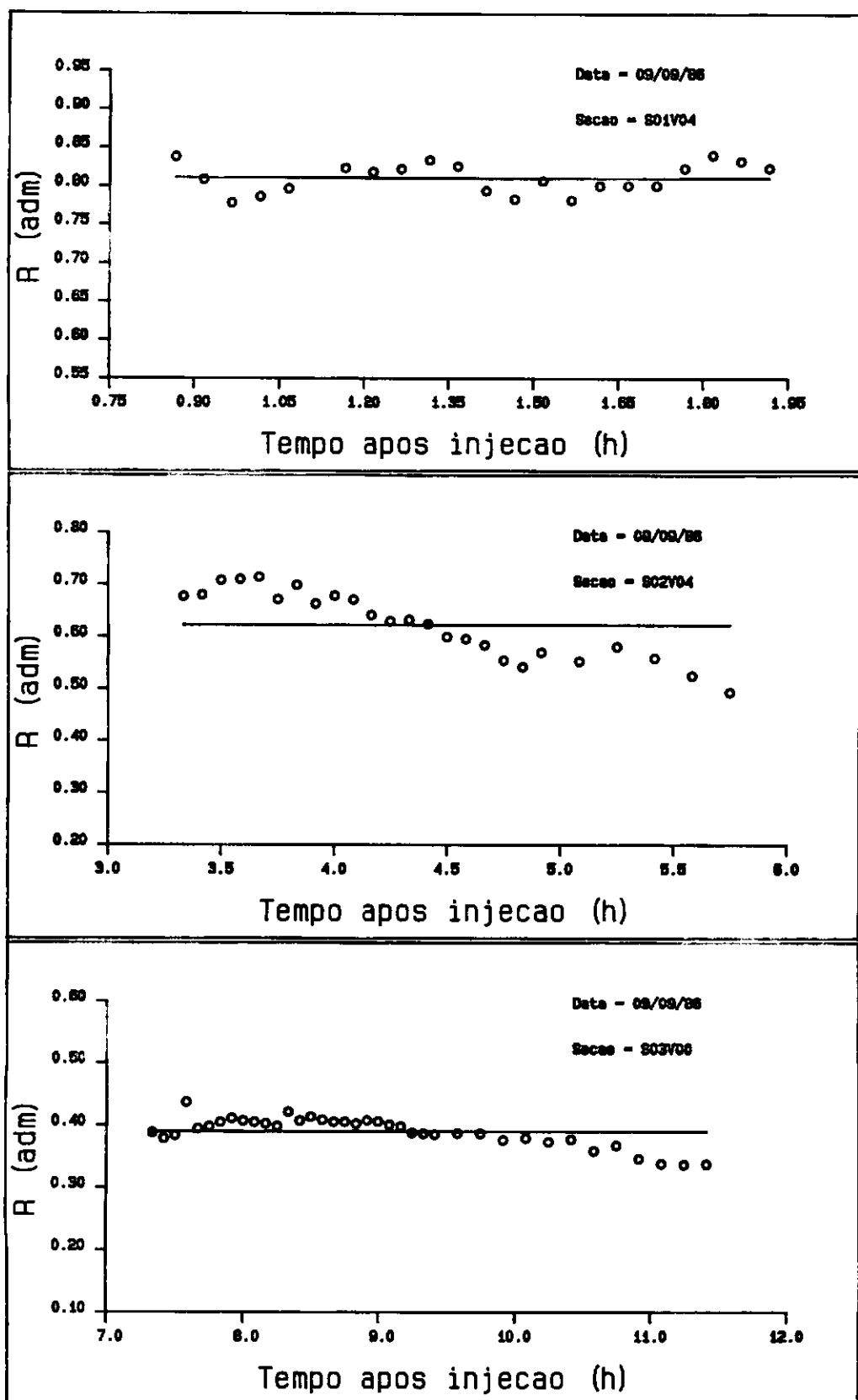
GRÁFICOS DE PERDA DE URANINA NOS ENSAIOS DOS DIAS 19/02/90,
09/09/86, 08/01/87, 29/01/87, 15/12/87, 28/02/91 E 26/02/91.



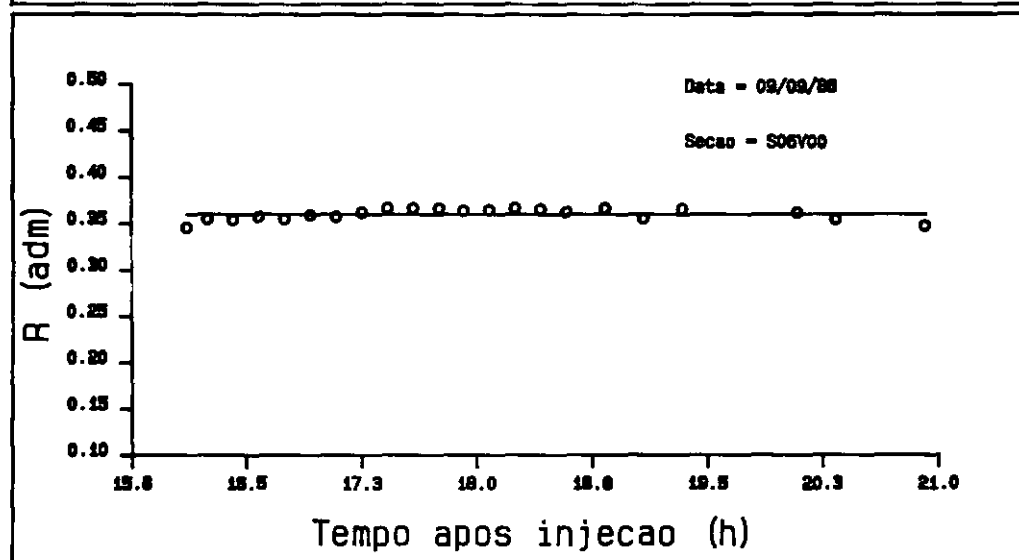
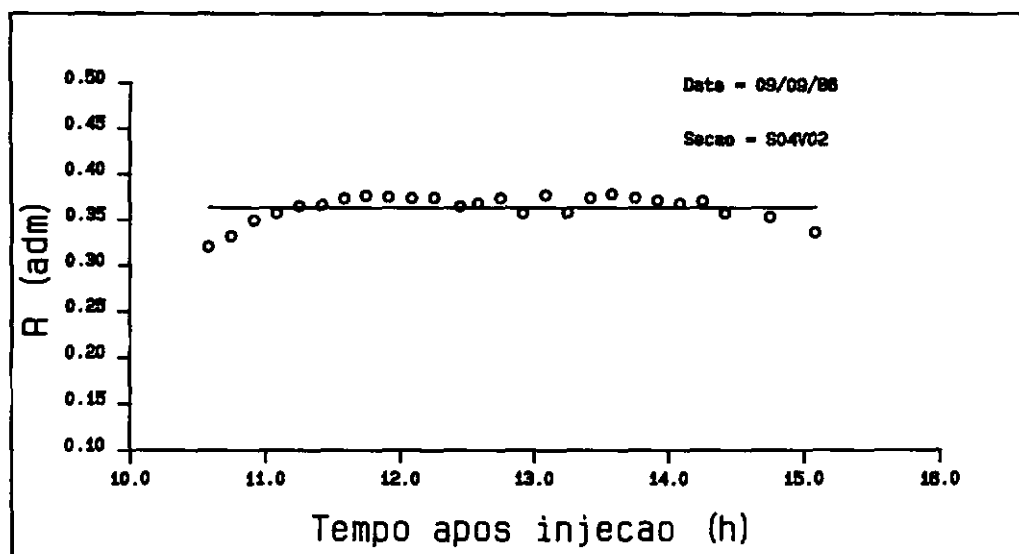
Gráficos de perda de Uranina nas seções situadas a 225, 285 e 340 m da injeção - ensaio de 19/02/90.



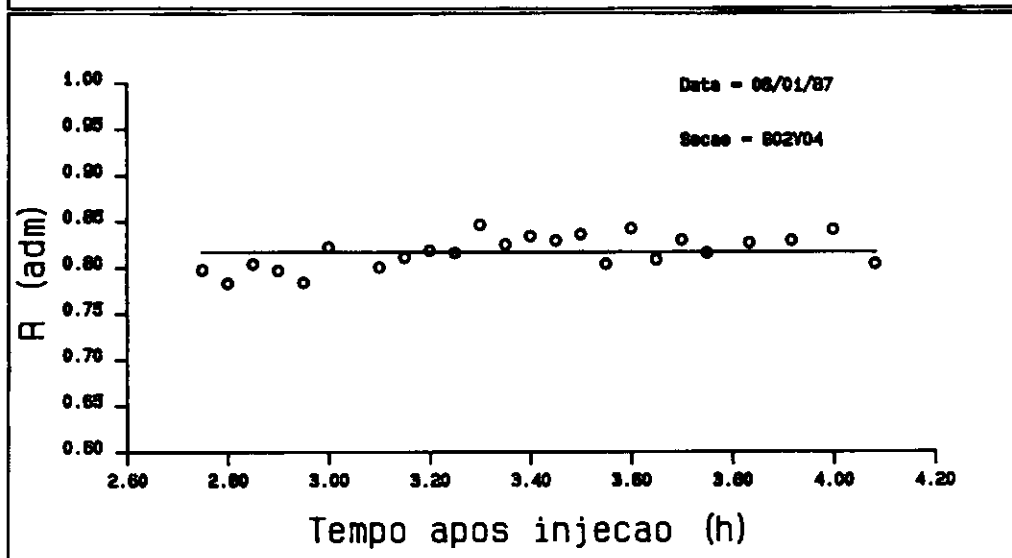
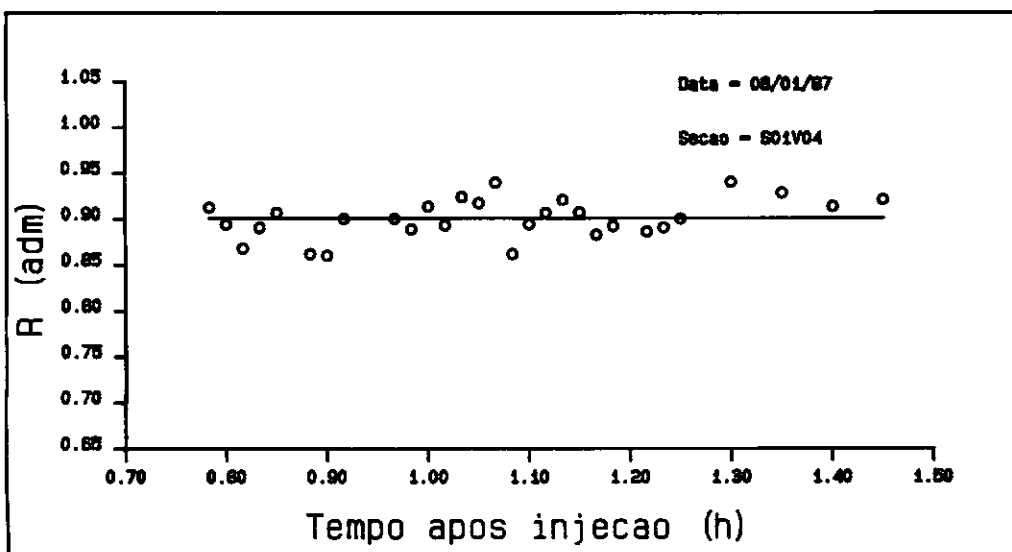
Gráficos de perda de Uranina nas seções situadas a 420, 490 e 560 m da injeção - ensaio de 19/02/90.



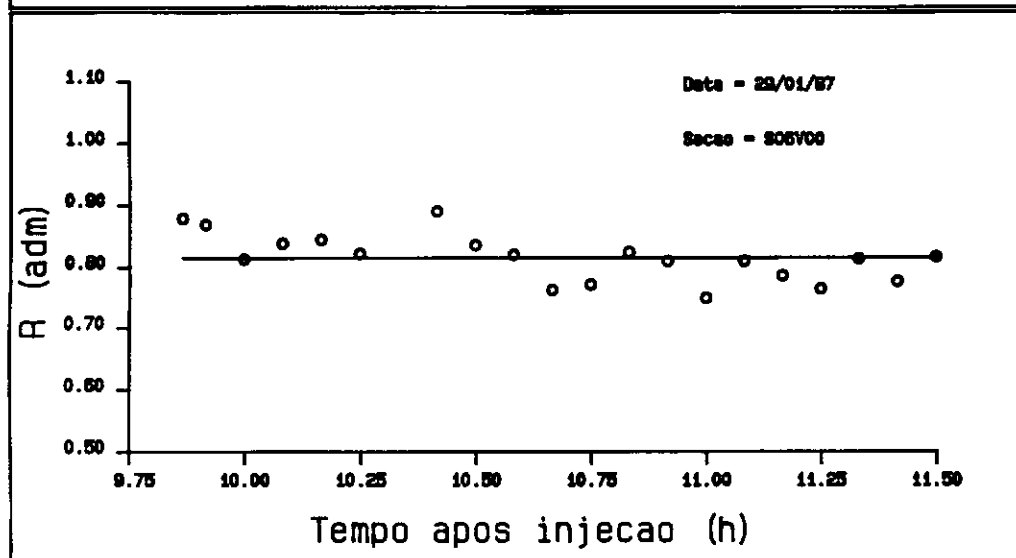
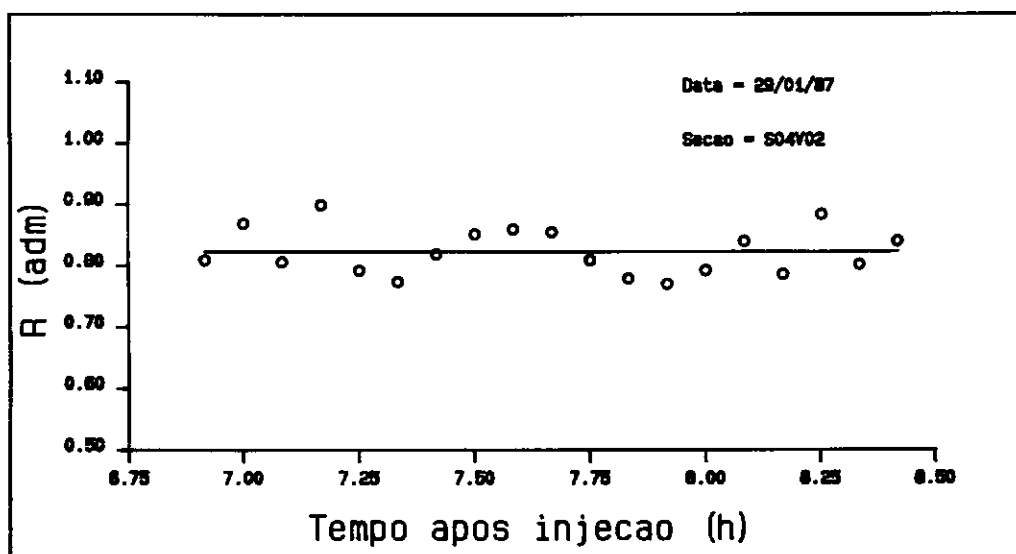
Gráficos de perda de Uranina nas seções S1 (vertical 04), S2 (vertical 04) e S3 (vertical única) - ensaio de 09/09/86.



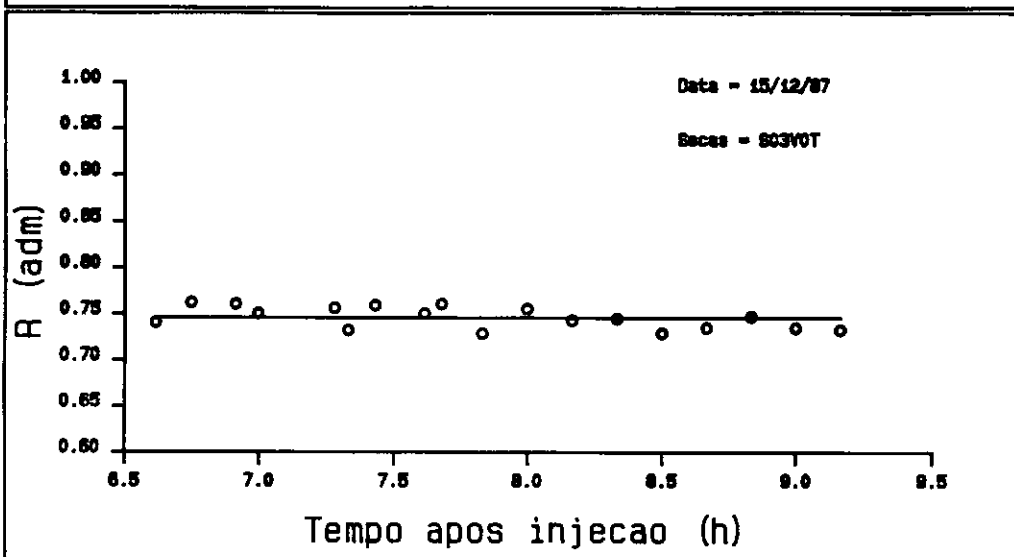
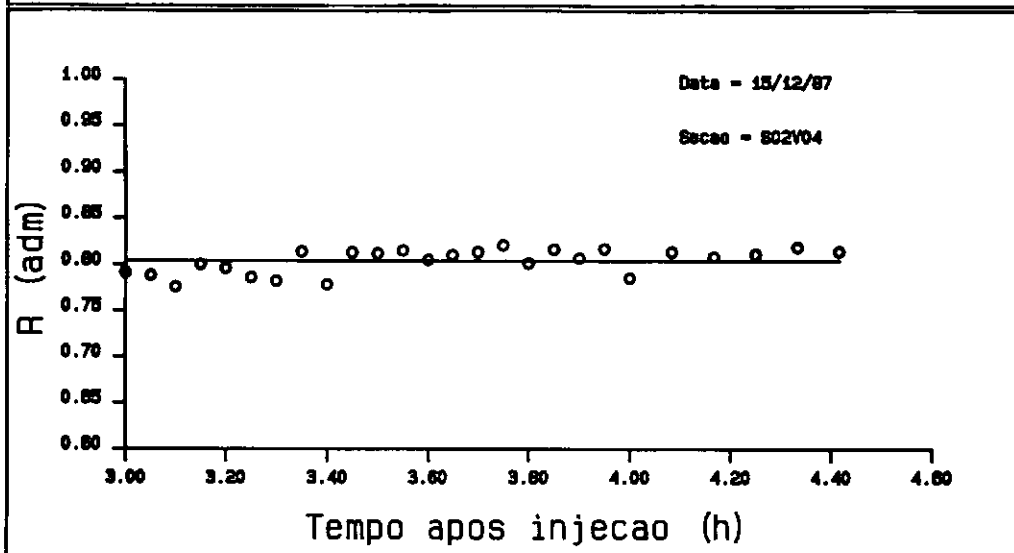
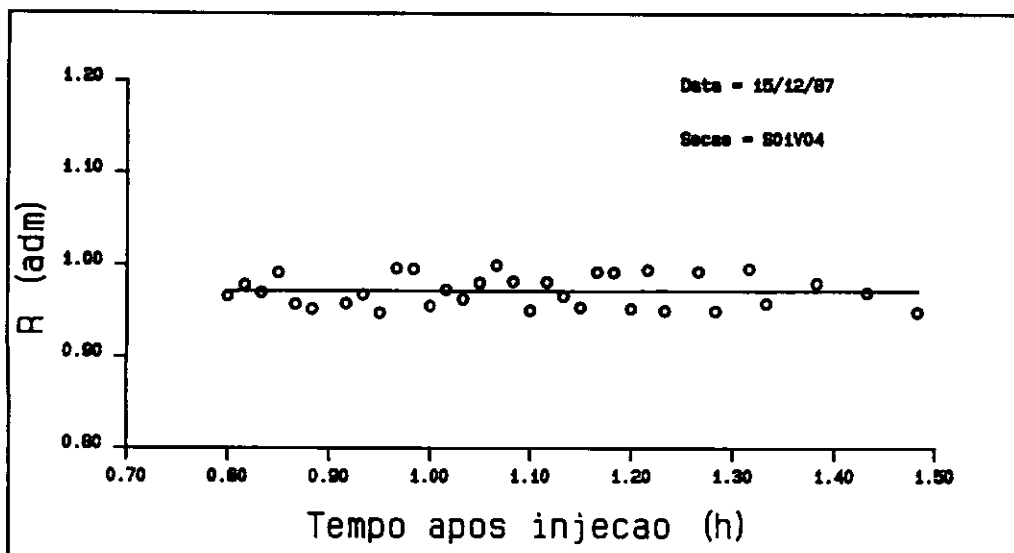
Gráficos de perda de Uranina nas seções S4 (vertical 02) e S6 (vertical única) - ensaio de 09/09/86.



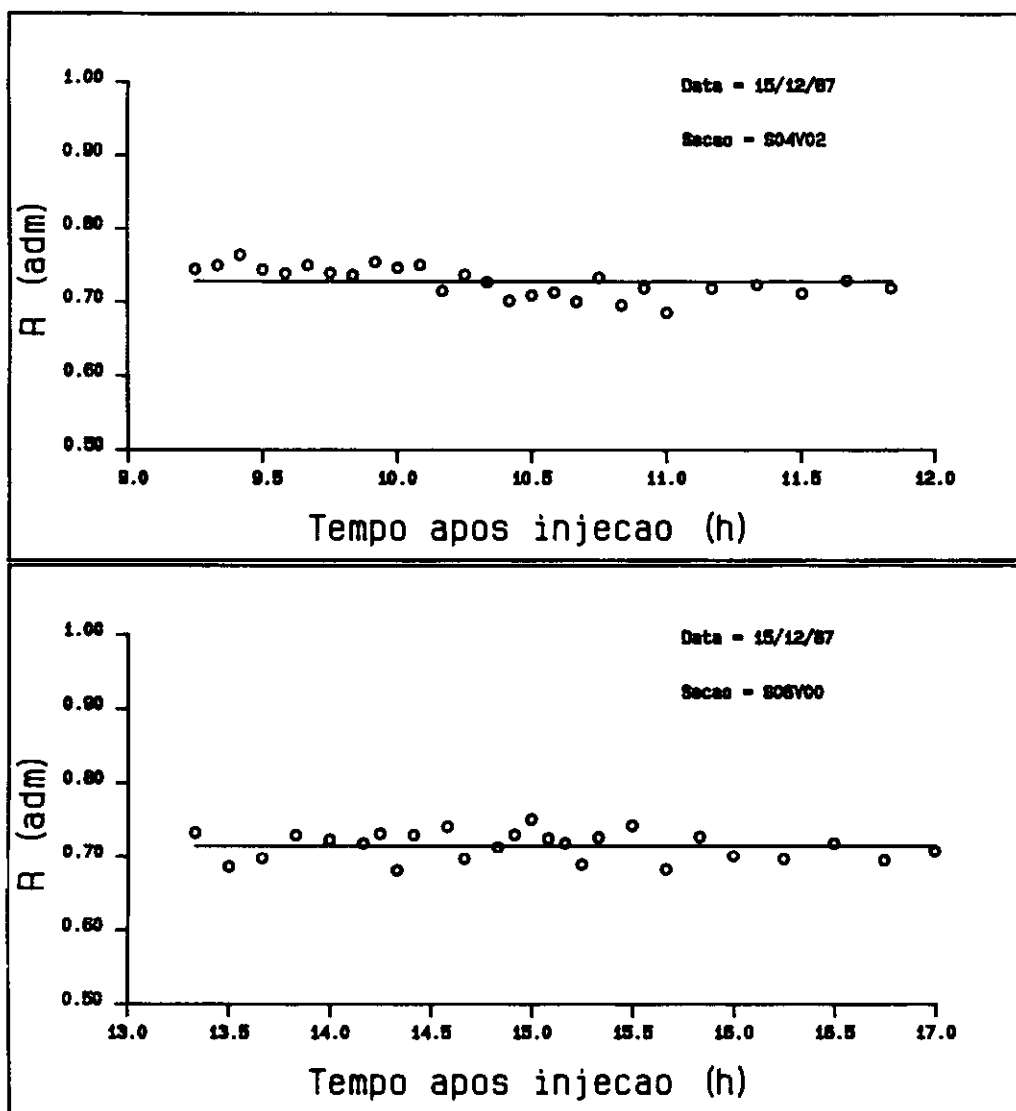
Gráficos de perda de uranina nas seções S1 (vertical 04) e S2 (vertical 04) - ensaio de 08/01/87.



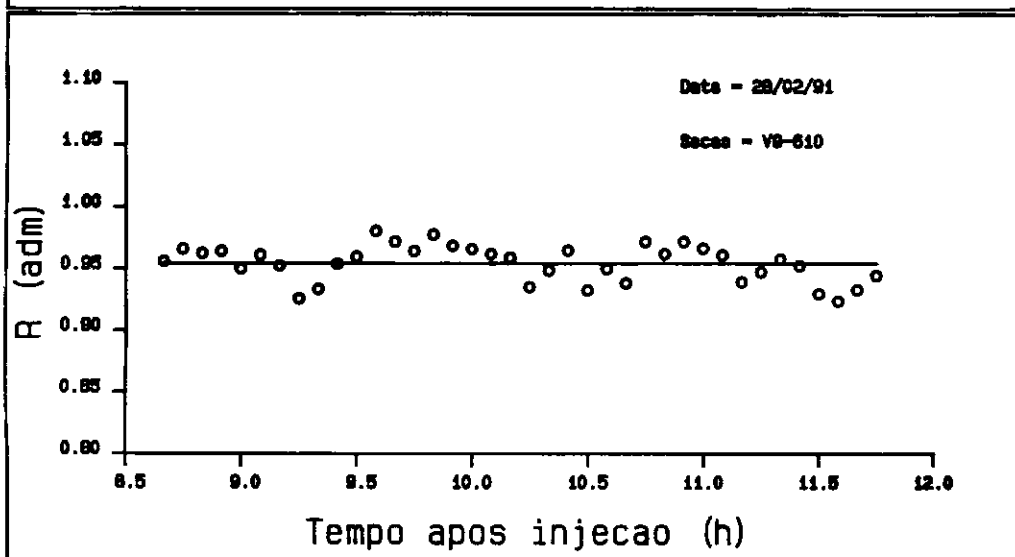
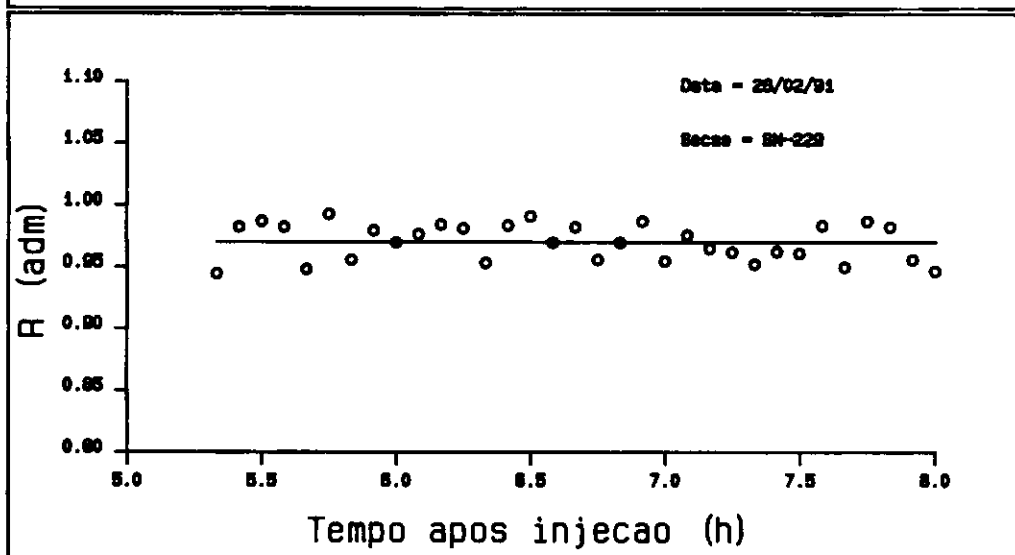
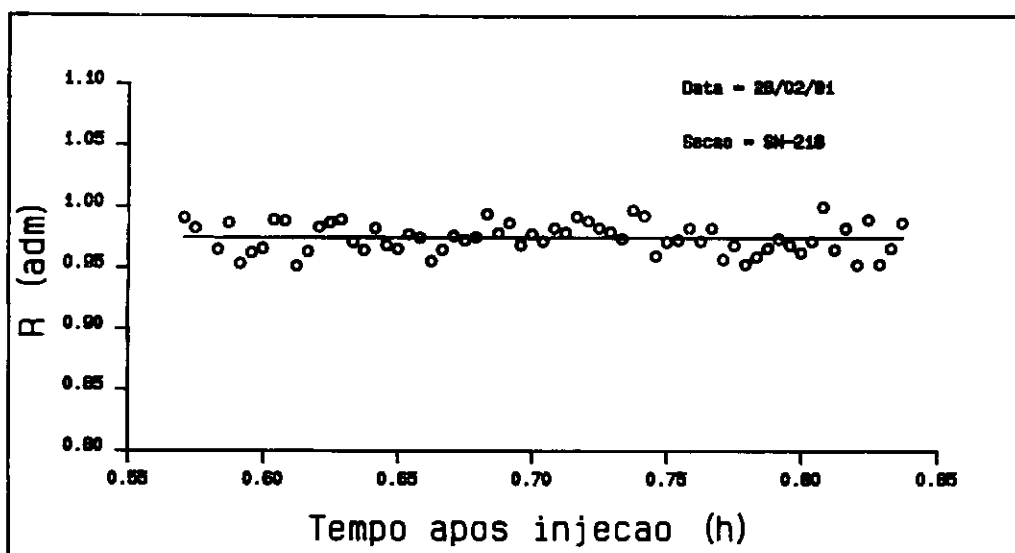
Gráficos de perda de uranina nas seções S4 (vertical 02) e S6 (vertical única) - ensaio de 29/01/87.



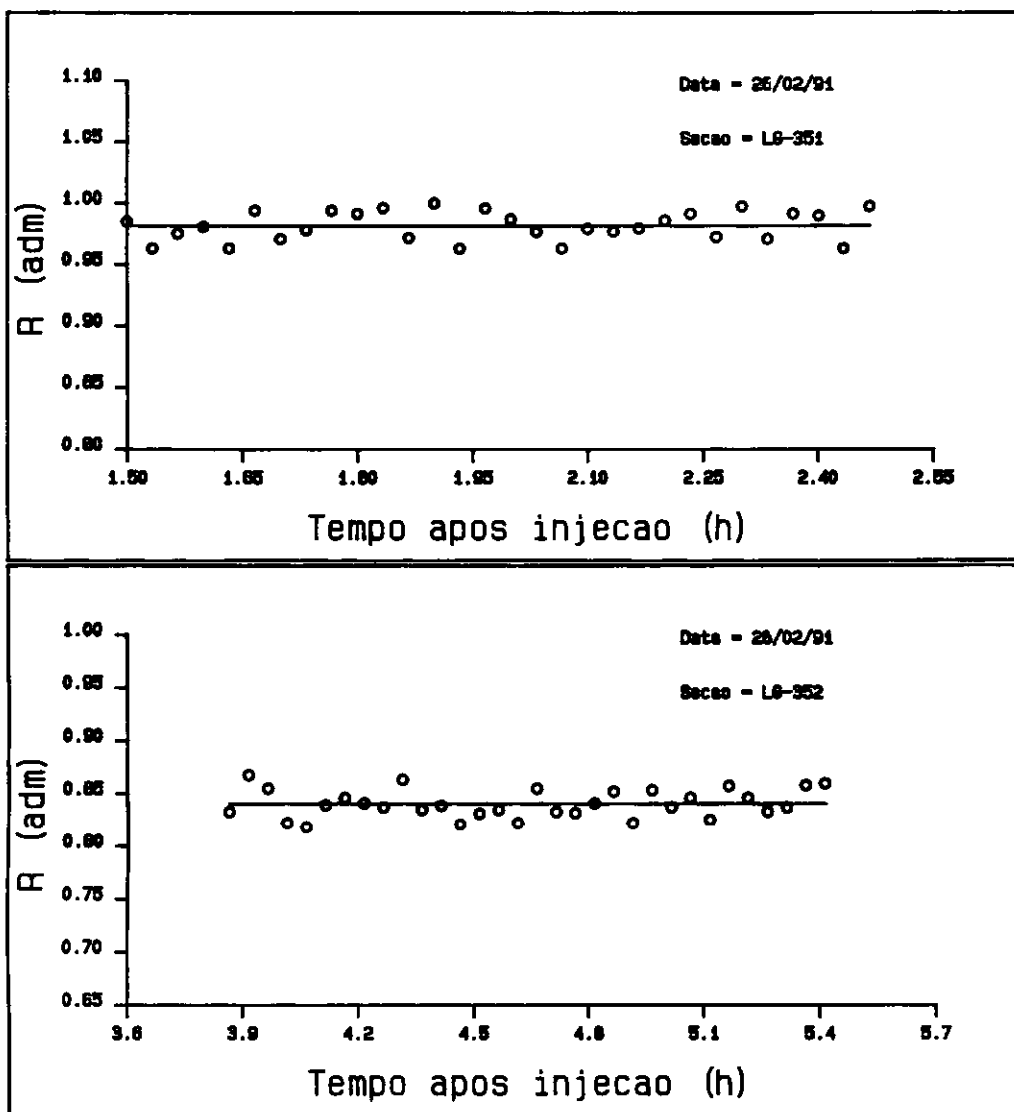
Gráficos de perda de Uranina nas seções S1 (vertical 04), S2 (vertical 04) e S3 (vertical única) - ensaio de 15/12/87.



Gráficos de perda de Uranina nas seções S4 (vertical 02) e S6 (vertical única) - ensaio de 15/12/87.



Gráficos de perda de Uranina nas seções SN218, SN229A e VG610A - ensaio de 28/02/91.



Gráficos de perda de Uranina nas seções LG351 e LG352 - ensaio de 28/02/91.